

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales
2017-2018

Trabajo Fin de Grado

Estudio de las Variables Locales en Simulaciones Tridimensionales de Procesos de Corte

César Rodríguez Abellán

Tutor:

Xavier Soldani

Leganés, Septiembre de 2018



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

RESUMEN

Este proyecto estudia el comportamiento de la súperaleación de níquel-cromo Inconel 718 en una operación de acabado superficial mediante un corte ortogonal en un torneado. Este material es uno de los más usados hoy en día en diversas industrias punteras como la aeroespacial, petrolífera y química.

El estudio se ha llevado a cabo mediante simulaciones lanzadas por el software de cálculo ABAQUS/CAE, basándonos en el Método de Elementos Finitos (MEF). En dicho software se ha implementado la ecuación constitutiva de Johnson-Cook como ley de comportamiento del material, teniendo en cuenta la termoviscoplasticidad del mismo. Hay que añadir que los resultados obtenidos por este método no son del todo exactos, pero alcanzan un nivel de precisión tal que se pueden considerar como válidos.

Se ha estudiado el impacto de tres profundidades de corte y dos valores distintos de “shear deletion” sobre la deformación equivalente, temperatura y velocidad de deformación en la viruta; así como la longitud de contacto y la temperatura en la superficie de desprendimiento de la herramienta.

Con base en los datos experimentales obtenidos se han sacado conclusiones que refuerzan la importancia de este tipo de simulaciones y pueden ayudar a entender y prevenir fenómenos tales como el desgaste por cráter.

ABSTRACT

This project studies the behavior of the super alloy with nickel-chromium base Inconel 718 in a surface finish operation through an ortogonal cut in a turning. This material is one of the most used nowadays in many leading industries such aerospace, oil and chemical.

The study was made through simulations in the calculus software ABAQUS/CAE, based Finite Elements Method (FEM). In this software was implemented the Johnson-Cook's constitutive equation like the material behavior law, given the thermoviscoplasticity of it. It must be added that the results obtained by this method aren't totally exact, but they reach a level of accuracy such that can be considered valid.

The impact of three cut depths and two differents values of shear deletion on the equivalent deformation, temperature and speed deformation in the chip was studied; as well as the contact length and temperature on the tool release surface.

Base on the experimental data obtained, conclusions have been drawn that reinforce the importance of this type of simulations and can help to understand and prevent phenomena such as crater wear.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS	9
CAPÍTULO I.....	10
1. Introducción	10
1.1. Estructura de la memoria.....	10
1.2. Motivación	11
1.3. Objetivos	11
1.4. Metodología	11
1.5. Descripción de la herramienta.....	13
1.6. Marco regulador	13
CAPÍTULO II	15
2. Estado del Arte.....	15
2.1. Mecanizado	15
2.1.1. Magnitudes de corte y de virutas.....	17
2.1.2. Corte Ortogonal.....	18
2.1.2.1. Geometría de la herramienta en corte ortogonal	18
2.1.2.1.1. Ángulo de incidencia.....	19
2.1.2.1.2. Ángulo de desprendimiento.....	19
2.1.2.2. Velocidades en un corte ortogonal	21
2.1.2.3. Fuerzas de corte en un corte ortogonal.....	21
2.1.2.4. Formación y morfología de la viruta	23
2.1.3. Operaciones de mecanizado	27
2.1.3.1. Torneado.....	27
2.1.3.1.1 .Partes de un torno.....	27

2.1.3.1.2. Trabajos en el torno	29
2.2. Inconel 718.....	31
2.2.1 Composición del Inconel 718.....	31
2.2.1.1. Fases en el Inconel 718	32
2.2.2. Propiedades del Inconel 718.....	34
2.2.3. Aplicaciones del Inconel 718	34
CAPÍTULO III	35
3. Modelizado del mecanizado en 3D aplicado al Inconel 718.....	35
3.1. Consideraciones básicas sobre el modelo	35
3.2. Mallado	36
3.3. Geometría de corte, parámetros de corte y condiciones de contorno.....	37
3.4. Ley de comportamiento.....	38
CAPÍTULO IV	40
4. Estudio propio	40
4.1 Aspectos generales, metodología y zonas de trabajo	40
4.2. Estudio de la deformación equivalente (PEEQ) en la viruta.....	42
4.3. Estudio de la temperatura (TEMP) en la viruta.....	45
4.4. Estudio de la velocidad de deformación (ER) en la viruta.....	48
4.5 Estudio de la longitud de contacto herramienta-viruta.....	51
4.6 Estudio de la temperatura de servicio de la herramienta de corte	53
CAPÍTULO V	56
5. Impacto socio-económico y presupuesto	56
5.1 Impacto socio-económico	56
5.2 Presupuesto	57
CAPÍTULO VI.....	60
6. Conclusiones y trabajos futuros	60
6.1. Conclusiones	60

6.2 Trabajos futuros	61
BIBLIOGRAFÍA.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de “shear deletion” con valor de 4.....	12
Figura 2. Zona de estudio “Izquierda”	13
Figura 3. Arranque mediante filos no determinados [5]	15
Figura 4. Arranque mediante filos geoméricamente determinados [5]	16
Figura 5. Corte ortogonal y corte oblicuo de ángulo i [8]	18
Figura 6. Superficies y ángulos en un corte ortogonal	19
Figura 7. Velocidades en un corte ortogonal [6]	21
Figura 8. Fuerzas de corte. a) Fuerzas sobre la viruta. b) Fuerzas sobre la herramienta, proporcionadas por un dinamómetro [10]	22
Figura 9. Diagrama de fuerzas en corte ortogonal [10]	23
Figura 10. Distintos bordes de grano [11]	23
Figura 11. Viruta segmentada [10]	24
Figura 12. Viruta discontinua [10]	25
Figura 13. a), b) y c) herramientas con BUE después del mecanizado. c), d) y e) herramientas una vez limpiado el BUE [18]	25
Figura 14. Principales zonas de la viruta [15]	26
Figura 15. Partes de un torno paralelo [16]	29
Figura 16. Zonas del mallado	36
Figura 17. Distintas caras del mallado de la pieza	36
Figura 18. Mallado de la pieza	37
Figura 19. Mallado de la herramienta	37
Figura 20. Ángulos de corte	38
Figura 21. Esquema de las simulaciones	40
Figura 22. Zonas de trabajo en la cara interna de la viruta	41
Figura 23. Zonas de trabajo según los perfiles: a) superficie de desprendimiento de la herramienta de corte, b) cara externa de la viruta	41
Figura 24. Valores medios de PEEQ graficados según sus zonas de trabajo	44

Figura 25. Valores máximos de PEEQ graficados según sus zonas de trabajo.....	45
Figura 26. Valores medios de TEMP graficados según sus zonas de trabajo	47
Figura 27. Valores máximos de TEMP graficados según sus zonas de trabajo	48
Figura 28. Valores medios de ER graficados según su zona de trabajo.....	50
Figura 29. Valores máximos de ER graficados según su zona de trabajo.....	51
Figura 30. Frame de medición de la longitud de contacto	52
Figura 31. Ejemplos de distintas longitudes de contacto en sus perfiles.....	52
Figura 32. Desgaste por cráter [29]	54
Figura 33. Mapas de temperatura en el filo de la herramienta con distintas profundidades de corte y valores de “shear deletion”	54
Figura 34. Valores medios y máximos de la temperatura en la herramienta	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Efectos de distintos ángulos de incidencia y desprendimiento	20
Tabla 2. Elección de ángulos de incidencia y desprendimiento según los materiales a utilizar .	20
Tabla 3. Composición química del Inconel 718 [21]	32
Tabla 4. Propiedades físicas del Inconel 718 [25] [26]	34
Tabla 5. Propiedades de la pieza y de la herramienta de corte.....	39
Tabla 6. Resultados de PEEQ en la zona "izquierda"	42
Tabla 7. Resultados de PEEQ en la zona "centro"	42
Tabla 8. Resultados de PEEQ en la zona "derecha"	43
Tabla 9. Resultados de PEEQ en la zona "frontal"	43
Tabla 10. Resultados de TEMP en la zona "izquierda"	46
Tabla 11. Resultados de TEMP en la zona "centro"	46
Tabla 12. Resultados de TEMP en la zona "derecha"	46
Tabla 13. Resultados de TEMP en la zona "frontal"	47
Tabla 14. Resultados de ER en la zona "izquierda"	49
Tabla 15. Resultados de ER en la zona "centro"	49
Tabla 16. Resultados de ER en la zona "derecha"	49
Tabla 17. Resultados de ER en la zona "frontal"	50
Tabla 18. Valores de las longitudes de contacto	53
Tabla 19. Resultados de la temperatura en la herramienta.....	54

CAPÍTULO I

1. Introducción

Este capítulo sirve como introducción, presentando las razones que llevan a este estudio, así como los objetivos que se quieren conseguir. También se especifica la estructura de la memoria.

1.1. Estructura de la memoria

La memoria del proyecto se estructura siguiendo los siguientes capítulos:

- **Capítulo I. Introducción:** Expone los motivos que llevan a este estudio, la metodología del trabajo y el software a utilizar. Se repasa también el marco regulador que rige el proyecto.
- **Capítulo II. Estado del arte:** Sienta las bases teóricas y las tecnologías sobre las que se centra este trabajo. Se habla sobre los procesos de mecanizado (en concreto el torneado); el Inconel 718 y sus propiedades, características y usos.
- **Capítulo III. Modelizado del mecanizado 3D aplicado al Inconel 718:** En este capítulo se habla de cómo se ha implementado un modelo 3D que simule la operación deseada. Se habla de las características del modelo, su geometría, mallado y la ley del comportamiento del material.
- **Capítulo IV. Estudio propio:** Se profundiza en la metodología de trabajo, concretando las zonas de estudio y la obtención de los datos. Se explican también las conclusiones que se obtienen a partir de los resultados.
- **Capítulo V. Entorno socio-económico y presupuesto:** Se trata el impacto socio-económico que tiene este trabajo.
- **Capítulo VI. Conclusiones y trabajos futuros:** A modo de corolario se recogen las conclusiones del estudio y se plantean posibles propuestas de mejora para futuros proyectos.

1.2. Motivación

Entre 1820 y 1840 se produjo un hito que no solo supuso un salto en la tecnología, si no un cambio en la sociedad y la economía pasando de una base rural y comercial a la industria y la mecanización. Este punto de inflexión en la Historia hoy en día se conoce como Primera Revolución Industrial.

La Revolución Industrial vino marcada por el desarrollo de la máquina de vapor, y con ella, una nueva forma de entender la siderurgia. Los metales ganaron aún más protagonismo gracias a la evolución de distintas formas de transporte (líneas de ferrocarril y locomotoras, barcos a vapor y automóviles). Entre todos ellos destacó uno: el acero. Desde entonces el acero ha gozado de una gran popularidad y se ha usado en cualquier aspecto de la industria.

Hoy en día, salvando el caso de Internet, no podemos hablar de una nueva verdadera Revolución Industrial; pero sí podemos destacar una industria cada vez más cambiante y exigente que obliga a desarrollar soluciones a las distintas necesidades que surgen. Entre ellas cabe señalar requisitos más estrictos de los materiales en cuanto a resistencia a temperatura, corrosión o tensiones; así como mayor ligereza.

Dentro de este marco nos encontramos con las que conocemos como súperaleaciones, unas aleaciones que presentan unas propiedades tales que las hacen superiores a las demás. Este es el caso del Inconel 718, una aleación de base níquel-cromo que hoy día se usa en varias de las industrias más exigentes [1]. A pesar de ello, no presenta una maquinabilidad demasiado buena; motivo que nos empuja a su estudio por ordenador.

Por otra parte, realizar todos los ensayos necesarios supone un gasto elevado [2], por lo que se requiere de simulaciones por ordenador suficientemente representativas que sustituyan esos experimentos empíricos. Mediante los distintos software podemos cambiar las condiciones que nos interesen para estudiar su impacto, simplificando significativamente la labor investigadora y reduciendo costes.

1.3. Objetivos

Con este proyecto se busca conseguir los siguientes objetivos:

1. Comprender y analizar el comportamiento del Inconel 718 en un proceso de torneado por corte ortogonal.
2. Estudiar el impacto que tienen los distintos valores de profundidad de corte y los de “shear deletion” en la deformación equivalente, temperatura y velocidad de deformación de la viruta; la longitud de contacto y temperatura en la superficie de desprendimiento de la herramienta.

1.4. Metodología

Se parte de una serie de archivos .ODB (Output Data Base) productos de las distintas simulaciones numéricas realizadas con ABAQUS/CAE. Se tienen un total de 6 simulaciones distintas que varían en la profundidad de corte empleada y un valor de “shear deletion”. Por “shear deletion” entendemos un valor máximo de deformación plástica a cortadura que puede tener un elemento. Con esto, si algún elemento llega a

tener un valor de deformación mayor que este límite, automáticamente se elimina dicho elemento y se le asigna un valor de deformación igual al límite (Ver *figura 1*).

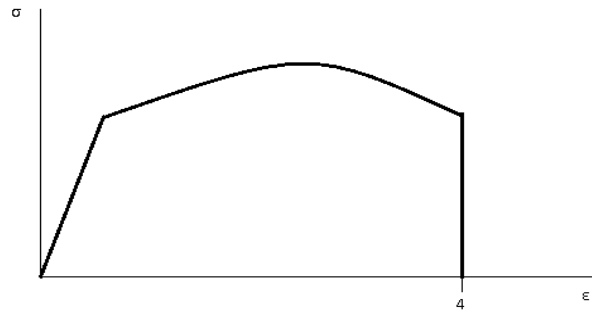


Figura 1. Ejemplo de “shear deletion” con valor de 4

De esta manera tenemos los siguientes valores para las variables independientes:

- **Profundidad de corte:** 0.15, 0.25 y 0.5 mm.
- **“Shear deletion”:** 4 y 6 (esto implica que ninguna deformación plástica a cortadura será mayor que 4 o 6 respectivamente).

Con estos valores se tendrá, entonces, una simulación con profundidad de corte 0.15 mm y “shear deletion” de 4 y otra de 6. Se repite esto análogamente con el resto de profundidades de corte.

En cada simulación se escogen unas determinadas zonas en las cuales se tomarán los datos necesarios para el estudio. Estas zonas cambiarán si se está estudiando la viruta o la herramienta. Se mantendrán constantes estas zonas para que los datos obtenidos partan de un mismo origen. Los datos se obtendrán de los nodos de la malla especificada para el método de elementos finitos. En apartados posteriores se detallarán en mayor medida dichas zonas, pero podemos distinguir:

- **Zonas de estudio en la viruta:** Se tienen un total de cuatro zonas. Tres en la cara interna de la viruta (en contacto con la herramienta), en la parte en la que se empieza a desprender de la pieza a mecanizar (conocida como zona primaria de cizallado). Se toman en el ancho de la viruta y se les denominarán “izquierda”, “centro” y “derecha”. La cuarta zona se encuentra en la cara de viruta que no está en contacto con la herramienta, llamándose “frontal”. Esta zona se ajustará al perfil que forme cada una de las magnitudes a estudiar.

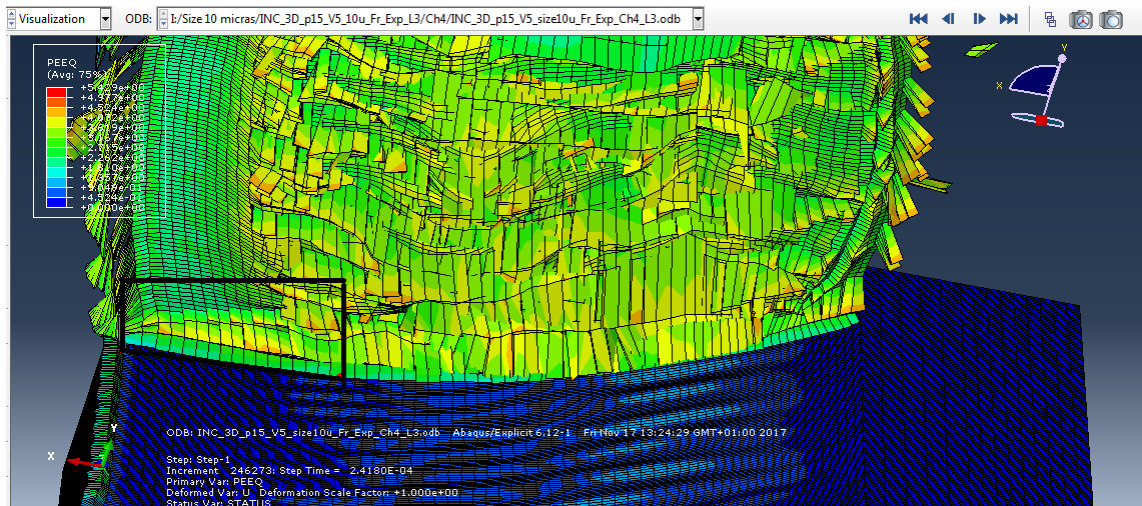


Figura 2. Zona de estudio “Izquierda”

- **Zonas de estudio en la herramienta:** La zona de estudio vendrá dada por el perfil de temperaturas en la superficie de desprendimiento para estudiar la temperatura en la misma. Dicho perfil nos será útil también para estudiar la longitud de contacto viruta-herramienta.

1.5. Descripción de la herramienta

Estudiar una pieza al completo supone un esfuerzo grande y un tiempo de cálculo muy elevado. Para solventar este problema se utiliza el Método de Elementos Finitos (MEF). Este método discretiza la pieza a estudiar mediante una malla y en cada uno de los nodos resuelve de forma iterativa una serie de ecuaciones [3].

Para este proyecto se ha usado ABAQUS/CAE, un software comercial de gran uso en todo tipo de problemas de ingeniería. Primeramente se diseña gráficamente en un archivo .CAE lo que se quiera estudiar, se le asignan unos determinados materiales, sus propiedades, el movimiento de las partes (si lo hubiese) y se dibuja una malla. Por otra parte se implementan las condiciones de trabajo y una ley de comportamiento en un archivo .INP. A cada archivo .INP se le asocia un .CAE y se lanza la simulación. El resultado de esta simulación es un archivo .ODB, en el cual se pueden obtener valores de distintas variables, distancias entre nodos o elementos, ángulos, etc. Es sobre este último tipo de archivo sobre el que se trabajará en el proyecto.

1.6. Marco regulador

Actualmente no hay ninguna normativa que regule las simulaciones numéricas por ordenador. Sí que nos encontramos con varias normativas reguladoras en operaciones de torneado y referentes a la utilización de materiales [30].

La norma UNE-EN ISO 23125:2015 establece medidas de seguridad en tornos. La norma UNE-ISO 13041:2011 en diferentes partes especifica las condiciones de ensayo para tornos de control numérico y centros de torneado.

En cuanto al Inconel 718 tenemos numerosas normativas UNE-EN (como 2583:1997, 3542:2018, 4123:2018 o 4673:2010) que regulan juntas, insertos, roscas o bulones de material aeroespacial basados en Inconel 718.

CAPÍTULO II

2. Estado del Arte

En este capítulo se hablará sobre la base teórica en la que se apoya el proyecto. Primeramente se hará un repaso por los distintos procesos de mecanizado para centrarnos en el torneado, nuestro caso de estudio. Se hablará también de las características de una operación de corte ortogonal y de la generación de viruta. Posteriormente se expondrán las características propias del Inconel 718 junto con sus aplicaciones.

2.1. Mecanizado

Se entiende como mecanizado el conjunto de operaciones utilizadas para conformar piezas mediante arranque de material. El material arrancado es lo que se conoce como viruta. La forma en la que se genera la viruta es de vital importancia en cualquier proceso de fabricación. Debe de arrancarse de forma homogénea para garantizar un acabado superficial correcto y conservar convenientemente la herramienta. Del mismo modo debe de ser eliminada para facilitar el resto de la operación. En este tipo de operaciones el gasto de energía es muy elevado y los desechos pueden llegar hasta el 90% de la pieza original [4]

La viruta es arrancada por el filo de la herramienta. En función del tipo de filo podemos clasificar las operaciones de mecanizado en dos tipos:

- **Procesos de arranque con filos no determinados:** Se consigue arrancar una viruta muy fina gracias a unos granos abrasivos, que no tienen una forma geométrica determinada.

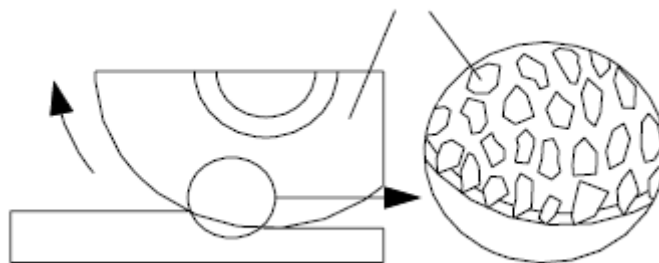


Figura 3. Arranque mediante filos no determinados [5]

- **Arranque con filos geoméricamente determinados:** En este caso los filos de la herramienta tienen una forma geométrica determinada. Ejemplos de este caso son el cepillado y el fresado, como puede verse en la *figura 4*. Nuestro caso de estudio pertenece a este tipo de mecanizado.

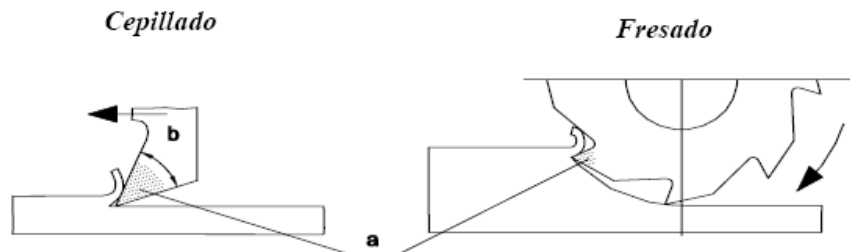


Figura 4. Arranque mediante filos geoméricamente determinados [5]

Independientemente del tipo de filo que tengamos, para poder arrancar viruta debemos tener movimiento relativo entre la herramienta y la pieza a mecanizar. Tenemos tres configuraciones para este fin:

- Mover la herramienta y dejar quieta la pieza
- Mover la pieza y dejar quieta la herramienta
- Mover tanto la pieza como la herramienta

De esta manera podemos definir una serie de movimientos que aparecen en el proceso de arranque de viruta:

- **Movimiento de corte:** Es aquel que sin avance arranca viruta en una revolución (si el movimiento es circular como en un torneado) o durante una carrea (como por ejemplo en un cepillado).
- **Movimiento de avance:** Este movimiento junto con el de corte es el que permite un continuo arranque de viruta.
- **Movimiento de penetración:** Determina la profundidad de corte y por tanto el espesor de la viruta que se generará.
- **Movimiento de aproximación:** No es un movimiento de mecanizado de por sí ya que no arranca material. Comprende el conjunto de todos los movimientos que realiza la herramienta antes de penetrar y arrancar material.

2.1.1. Magnitudes de corte y de virutas

Las magnitudes de corte (o parámetros tecnológicos) son aquellos valores que se deben ajustar para que el mecanizado se dé de forma óptima. El modo en que se ajusten estas magnitudes influirá significativamente en aspectos como las fuerzas de corte o el acabado. Distinguimos tres parámetros diferentes:

- **Velocidad de corte.** Es la velocidad lineal relativa que hay entre la pieza y la herramienta en el proceso de arranque de viruta. Normalmente se mide en metros por minuto (m/min). Hay que escoger una velocidad de corte adecuada ya que si es muy baja la productividad también lo será, pero si es excesivamente alta la herramienta se desgastará más rápido de lo deseado. El valor óptimo de la velocidad de corte es experimental, pues depende de otros factores como el material de la pieza y la herramienta, la sección de viruta, la refrigeración del sistema, etc. Aun así, los fabricantes de herramientas suelen dar unas velocidades orientativas para cada material. A partir de la velocidad de corte es posible calcular las revoluciones por minuto “ n ” a las que tienen que girar la pieza o la herramienta, mediante la expresión:

$$V_c = \frac{\pi \cdot n \cdot D}{1000}$$

Donde:

V_c =Velocidad de corte en m/min.

D = Diámetro de la pieza o de la herramienta, según corresponda, en mm.

n =Revoluciones de la pieza o de la herramienta en un minuto (r.p.m.).

- **Avance:** Es la distancia recorrida por la herramienta en cada revolución o carrera. Se mide en milímetros (mm) y se le suele llamar “ a ”. Una vez que sabemos el avance y la velocidad de giro “ n ” podemos calcular la velocidad de avance “ V_a ” gracias a la expresión:

$$V_a = a \cdot n$$

- **Profundidad de corte:** Llamada como “ p ” es la distancia que penetra la herramienta en la pieza. También se expresa en milímetros (mm). Nos da la sección de la viruta que posteriormente se arrancará. La sección de viruta “ S ”, medida en mm^2 , la podemos obtener a partir de la profundidad de corte y del avance a partir de la expresión:

$$S = a \cdot p$$

2.1.2. Corte Ortogonal

En la realidad la gran mayoría de las operaciones se hacen mediante corte oblicuo ya que facilita la salida de la viruta, algo beneficioso para el corte. En este estudio, sin embargo, se trabajará con un corte ortogonal ya que simplifica enormemente los cálculos al eliminarse variables. Se puede considerar el corte ortogonal una simplificación del corte oblicuo, ya que el ángulo de inclinación suele ser menor a 15° en la mayoría de los casos y puede suponerse de 0° [7].

En este tipo de cortes la herramienta presenta una forma de cuña, siendo el filo perpendicular a la velocidad relativa herramienta-pieza. Con esto se obtiene el ya nombrado arranque de viruta y se genera el llamado plano de corte, sobre el cual se va deformando plásticamente la viruta.

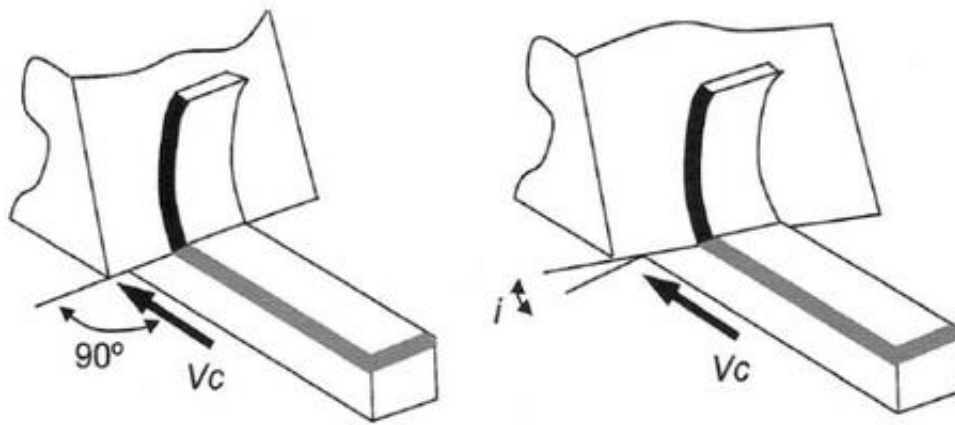


Figura 5. Corte ortogonal y corte oblicuo de ángulo i [8]

2.1.2.1. Geometría de la herramienta en corte ortogonal

Los elementos más importantes a destacar en una herramienta que trabaja en un corte ortogonal son [6]:

- **Filo:** Es la arista que corta el material y permite arrancar la viruta.
- **Superficie de desprendimiento:** Cara de la herramienta sobre la que desliza la viruta.
- **Superficie de incidencia:** Cara de la herramienta que queda enfrentada a las superficie de la pieza que ha sido trabajada.

Estos elementos generan los siguientes ángulos [6]:

- **Ángulo de incidencia (α_n):** Está formado por la superficie de incidencia y el plano dado por el filo y la velocidad de corte.

- **Ángulo de filo (β_n):** También llamado ángulo de herramienta. Está formado por las superficies de desprendimiento e incidencia.
- **Ángulo de desprendimiento (γ_n):** Formado por la superficie de desprendimiento y el plano normal al conformado por el filo y la velocidad de corte.

El subíndice “n” únicamente hace referencia a un corte ortogonal. Pueden verse todos estos elementos en la *figura 6*.

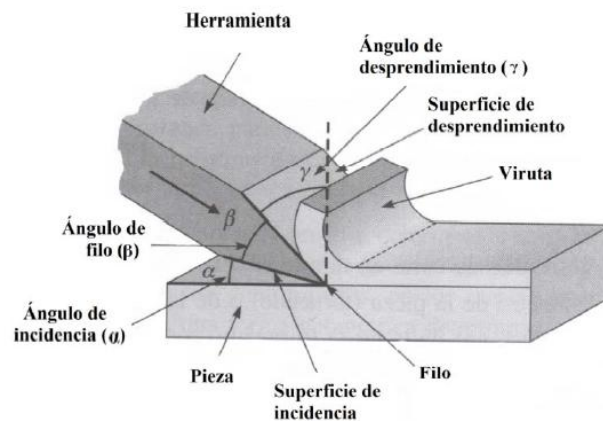


Figura 6. Superficies y ángulos en un corte ortogonal

2.1.2.1.1. Ángulo de incidencia

Si este ángulo es demasiado pequeño, el contacto con la pieza mecanizada será mayor. Esto implica un rozamiento excesivo y un claro aumento de la temperatura, lo que se traduce en un temprano desgaste de la herramienta. Por otra parte si es demasiado grande estaremos evitando estos problemas, pero el filo se debilitará.

Se elegirá el ángulo del ángulo en función tanto del material de la pieza como del de la herramienta. Si ambos materiales son duros habrá que dar un ángulo pequeño para que la herramienta resista. Si trabajamos con materiales dúctiles y herramientas de acero rápido podemos utilizar ángulos de incidencia mayores.

2.2.1.1.2. Ángulo de desprendimiento

Si utilizamos un ángulo de desprendimiento grande, la herramienta podrá penetrar bien en la pieza y cortará bien, lo que nos proporcionará un gran acabado superficial pero debilitará el filo. Por otra parte, si este ángulo es pequeño la resistencia de la herramienta se verá favorecida a cambio de una energía consumida mayor y también un mayor calentamiento de la herramienta.

Normalmente el ángulo de desprendimiento escogido será el mayor que la herramienta a utilizar sea capaz de soportar sin romperse. Esta elección está de nuevo condicionada por el material de la herramienta y la pieza, pero además por el avance.

Las fuerzas de reacción del material en un proceso de corte ortogonal no actúan en el filo de la herramienta, si no en una zona interna de la herramienta. Cuanto menor es el ángulo de desprendimiento más se aleja del filo esta zona [7]. Que la zona esté más alejada del filo implica que la sección de la herramienta que soporta estas reacciones será mayor. Por este motivo se utilizarán ángulos de desprendimiento pequeños para herramientas de materiales poco resistentes.

En cuanto a la pieza a mecanizar, si presenta gran dureza se dan grandes fuerzas de corte. Esto supone que la sección de la herramienta a soportar las reacciones necesariamente tiene que ser grande, lo que implica disminuir el ángulo de desprendimiento.

Podemos diferenciar entre herramientas con geometría positiva si su ángulo de desprendimiento es mayor que 0° y herramientas con geometría negativa si es menor que 0° .

Se sintetizan los efectos de los distintos valores de ángulos de desprendimiento e incidencia en la *Tabla 1*:

Ángulo	Valor alto	Valor bajo
Incidencia	Poco contacto con la pieza a mecanizar. Debilitación del filo.	Mayor rozamiento y temperatura de la herramienta. Mayor desgaste.
Desprendimiento	Buena penetración y acabado superficial. Debilitación de filo.	Mayor resistencia de la herramienta. Aumento de la energía consumida y del calentamiento de la herramienta.

Tabla 1. Efectos de distintos ángulos de incidencia y desprendimiento

También se recoge cuándo usar valores altos o bajos de estos ángulos en función de los materiales a usar en la *tabla 2*:

Ángulo	Valor alto	Valor bajo
Incidencia	Materiales dúctiles y aceros rápidos.	Herramienta y pieza duras.
Desprendimiento	Material a mecanizar blando y herramienta resistente.	Herramienta poco resistente.

Tabla 2. Elección de ángulos de incidencia y desprendimiento según los materiales a utilizar

2.1.2.2. Velocidades en un corte ortogonal

En un corte ortogonal aparecen intervienen varias velocidades [7]:

- **Velocidad de corte (V_c):** Se definió anteriormente como la velocidad lineal relativa entre la herramienta y la pieza
- **Velocidad de deformación o de cizallamiento (V_s):** Es la velocidad con la que se rompe la viruta.
- **Velocidad de salida de la viruta (V_v):** Es la velocidad que la viruta presenta respecto la herramienta.

Se representan gráficamente estas velocidades en la *figura 7*:

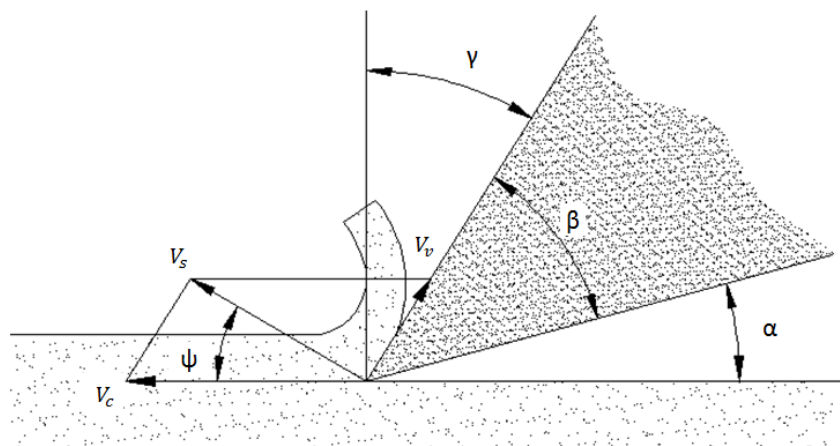


Figura 7. Velocidades en un corte ortogonal [6]

En la *figura 7* puede observarse un ángulo ψ entre la velocidad de corte y la velocidad de deformación. Este ángulo es llamado ángulo de cizallado y es definido como el ángulo según el cual se corta la pieza para generar viruta.

2.1.2.3. Fuerzas de corte en un corte ortogonal

El estudio de las fuerzas de corte en un proceso de mecanizado es de vital importancia, pues puede proporcionarnos información sobre aspectos como por ejemplo la potencia necesaria para realizar la operación [10].

La fuerza que la herramienta ejerce sobre la viruta está formada por dos componentes normales entre sí: La fuerza de fricción “ F ”, que es la que se resiste al flujo de la viruta; y la fuerza normal “ N ”. Mediante la relación entre estas dos fuerzas se define el coeficiente de fricción “ μ ” entre la herramienta y la viruta:

$$\mu = \frac{F}{N}$$

Estas dos fuerzas pueden sumarse vectorialmente para formar la fuerza resultante “ R ”. Esta fuerza está orientada un ángulo “ β_n ”, conocido como ángulo de fricción. Este ángulo está relacionado con el coeficiente de fricción antes mencionado mediante la expresión:

$$\mu = \tan \beta_n$$

Por otra parte, la pieza a mecanizar también ejerce fuerzas sobre la herramienta. Estas son la fuerza cortante “ F_s ” causante de la deformación que tiene lugar en el plano de corte y la normal a la cortante “ F_n ”, perpendicular a la fuerza cortante. Estas dos últimas tienen una resultante llamada “ R ”. Es necesario que todas las fuerzas que se dan en la operación estén equilibradas, por eso “ R ” tiene que ser igual a “ R ” pero en sentido opuesto.

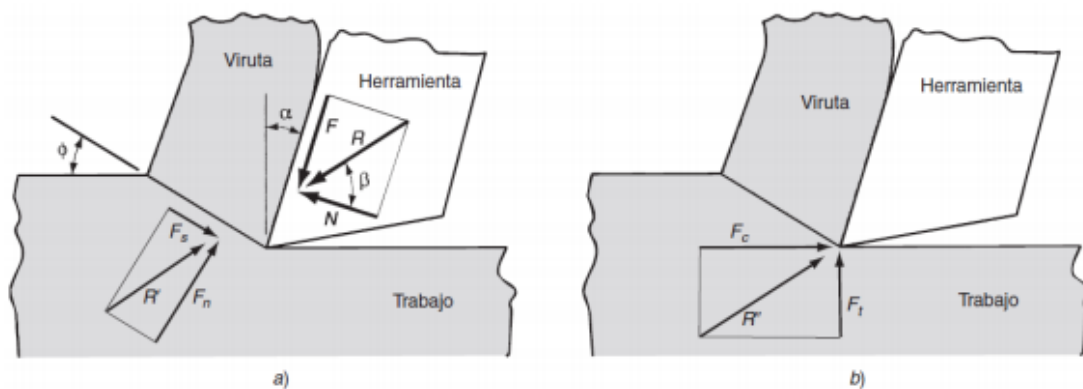


Figura 8. Fuerzas de corte. a) Fuerzas sobre la viruta. b) Fuerzas sobre la herramienta, proporcionadas por un dinamómetro [10]

No es posible medir ninguna de estas fuerzas directamente en un mecanizado. Para solventar este problema se incluye un dinamómetro en la herramienta de corte que nos proporciona dos fuerzas adicionales: La fuerza de corte “ F_c ”, cuya dirección coincide con la de la velocidad de corte; y “ F_t ”, perpendicular a la fuerza de corte y además relacionada con la profundidad de corte.

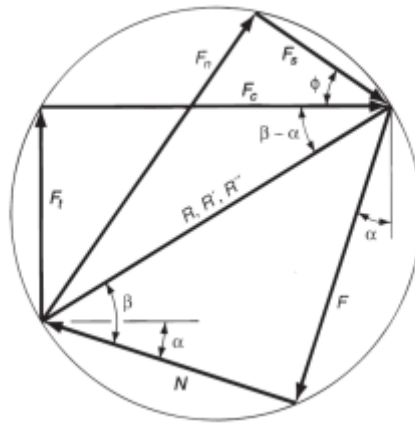


Figura 9. Diagrama de fuerzas en corte ortogonal [10]

Gracias a las fueras aportadas por el dinamómetro situado en la herramienta de corte y basándonos en la *figura 9* obtenemos una serie de ecuaciones que nos permiten expresar las cuatro fuerzas que no pueden medirse con las dos que sí:

$$F = F_c \cdot \text{sen } \alpha + F_t \cdot \cos \alpha$$

$$N = F_c \cdot \cos \alpha - F_t \cdot \text{sen } \alpha$$

$$F_s = F_c \cdot \cos \phi - F_t \cdot \text{sen} \phi$$

$$F_n = F_c \cdot \text{sen } \phi + F_t \cdot \cos \phi$$

2.1.2.4. Formación y morfología de la viruta

La formación de la viruta viene dada según la forma en la que se rompe el material trabajado. Los materiales duros se romperán de forma súbita y en trozos grandes, mientras que aquellos que sean más dúctiles se deformarán antes de romperse. La rotura del material se origina de forma interna, a nivel microscópico; así pues las propiedades del material serán determinantes a la hora de definir la formación de la viruta.

En nuestro caso se trabaja con metales. Estos están formados por una serie de poliedros que reciben el nombre de granos. Si estos granos están sometidos a un esfuerzo lo suficientemente grande como para deformarse se empezarán a orientar en planos, llamados fibras.

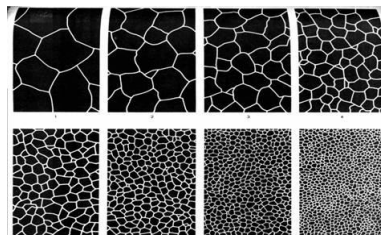


Figura 10. Distintos bordes de grano [11]

Bajo el efecto de una fuerza dichos planos empezaran a deslizarse entre sí, llegando a separarse el material. Este material separado (o arrancado como se dijo anteriormente) es la viruta.

Una de las formas más típicas de clasificar los tipos de viruta [13], con distintas características [10] [14] en tres tipos es la siguiente:

1. Segmentos individuales que en algunos casos se adhieren unos a otros. Podemos diferenciar dos subgrupos en este caso:

- **Viruta segmentada:** Presenta forma de dientes de sierra, con grandes zonas de bajas deformación cortante y pequeñas zonas de alta deformación cortante. Está presente en materiales de baja conductividad térmica y alta resistencia mecánica. Es propio de las aleaciones de titanio.



Figura 11. Viruta segmentada [10]

- **Viruta discontinua:** Propia de materiales relativamente frágiles con bajas velocidades de corte. La viruta presenta segmentos separados, que a veces pueden estar unidos sin cohesión. Está provocada por una gran fricción entre la herramienta y la viruta, junto con grandes avances y profundidades de corte. Como no es continua puede provocar vibraciones y traqueteos en la máquina-herramienta.

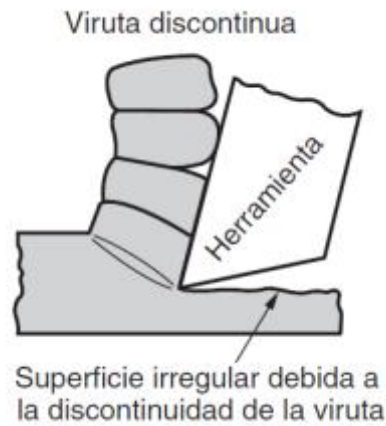


Figura 12. Viruta discontinua [10]

2. Viruta sin fractura, formada por deformación continua del metal. Se da en materiales dúctiles con altas velocidades de corte o ángulos de desprendimiento altos. Normalmente tiene buen acabado superficial, pero la acumulación de viruta puede suponer un problema.
3. Similar al tipo 2, excepto que la herramienta presenta una masa del metal formado por adherencia como resultado del deslizamiento de la viruta en la cara de la herramienta. También es conocida como viruta de borde recrecido. Se da al mecanizar materiales dúctiles a velocidades de corte bajas o medias. La presión es la responsable de la adhesión del material a la herramienta, que se acumula en el borde (BUE). El BUE se produce de forma cíclica: se forma, crece, se vuelve inestable y por último se rompe. Este ciclo implica un peor acabado superficial.

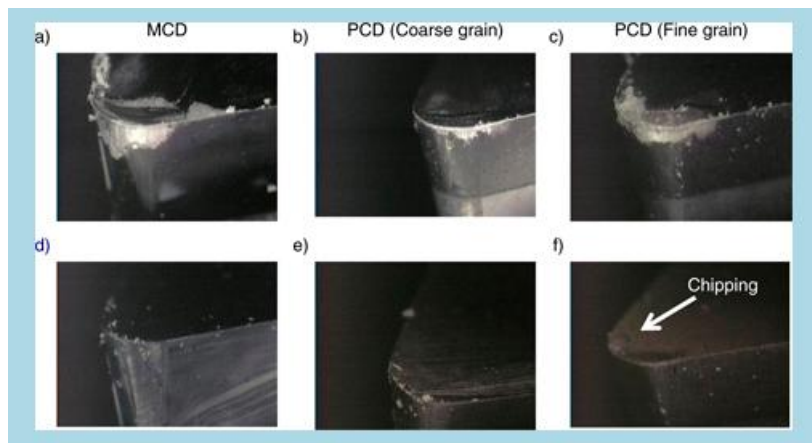


Figura 13. a), b) y c) herramientas con BUE después del mecanizado. c), d) y e) herramientas una vez limpiado el BUE [18]

La forma y el tipo de la viruta pueden variar atendiendo a distintos factores [12]. Puede ser una viruta continua y suave (poca segmentación), o puede estar conformada por una serie de láminas desprendidas por cizallamiento (mayor segmentación posible). Hay que destacar que cuanto mayor sea la segmentación en la viruta más fácil será su eliminación, algo deseable.

Las energías de deformación y fricción se disipan en forma de calor, que aumenta la temperatura en determinadas zonas de corte. Se pueden apreciar zonas diferenciadas (*figura 14*) en la viruta en función del aumento de la temperatura o de la generación de calor [7]:

1. **Zona primaria:** Es la zona de mayor cizalladura y donde las deformaciones plásticas alcanzarán valores más altos. El flujo de materia tiene un cambio brusco de dirección, sometiendo al material a elevados niveles de tensiones y temperatura. En torno al 80% del calor se generará en esta zona.
2. **Zona secundaria:** Hay contacto directo entre la herramienta y la viruta. Se da fricción en la longitud de contacto, así como presión, lo que se traduce en un aumento de la temperatura de la herramienta (un 18% del calor generado). A veces incluso se da fusión del material mecanizado, pudiendo generar un “filo recrecido” en la punta de la herramienta (el BUE antes mencionado). Este nuevo borde varía la geometría de la herramienta, lo que afecta negativamente al acabado superficial. Depende de los parámetros de corte, por lo que no siempre se da.

Para evitar el BUE es deseable reducir la fricción entre la viruta y la herramienta. Puede conseguirse mediante lubricación (disminuye la temperatura y el rozamiento), aumentando la velocidad de corte o el ángulo de desprendimiento.

3. **Zona terciaria:** Es la zona donde se da el contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo. Es difícil cuantificar las presiones que hay en esta zona, pero se ha demostrado que su valor es mucho menor que en la zona secundaria (supone un 2% del calor generado). El acabado superficial está relacionado con esta zona.



Figura 14. Principales zonas de la viruta [15]

2.1.3. Operaciones de mecanizado

Atendiendo al movimiento relativo entre la pieza diferenciamos los distintos procesos de mecanizado. En ellos intervienen varios elementos: la máquina-herramienta, las herramientas de corte y los elementos de sujeción. De este modo contamos con:

- **Fresado:** En este caso quien cuenta con el movimiento de corte es la herramienta de corte, que se llama fresa. La fresa gira sobre sí misma para cortar, mientras que el movimiento de avance viene dado por el desplazamiento de la pieza, fijada sobre la mesa.
- **Taladrado:** En este caso la pieza también se encuentra fijada a la mesa. Tanto el movimiento de corte como el de avance está producido por la herramienta de corte, la broca. El movimiento de corte está definido por el giro de la broca sobre sí misma, mientras que el de avance se produce por desplazamiento lineal de la misma.
- **Torneado:** Es el proceso que normalmente más se usa dada su versatilidad. La pieza se fija sobre el plato del torno (la máquina-herramienta de este proceso) que gira en torno a su eje generando el movimiento de corte. La herramienta de corte realiza el movimiento de avance para cortar el material. El proceso de este proyecto es un torneado, por lo que se describe más detalladamente a continuación. Hay que añadir que en ningún otro proceso de mecanizado se alcanzan unos niveles de temperatura y tensiones tan elevadas como en el torneado, lo que refuerza el interés de este tipo de simulaciones.

2.1.3.1. Torneado

Mediante torneado se consiguen mecanizar figuras de revolución gracias al arranque de virutas realizado por una herramienta de filo geoméricamente determinado (*figura 4*). La máquina-herramienta empleada se llama torno. Existe una gran variedad de tornos que posibilitan la creación de todas las piezas que requiere la industria.

Los tornos pueden ser verticales o paralelos. Los primeros se usan para la fabricación de piezas de gran diámetro, poca longitud y un peso considerable, por lo que suelen ser más robustos que los tornos al aire. En cualquier caso, el tipo de torno que más se utiliza en general es el torno paralelo. El tamaño de serie en un torno paralelo puede ser desde piezas unitarias hasta un número limitado.

2.1.3.1.1 .Partes de un torno

Al torno paralelo, en su configuración más típica, se le conoce también como torno universal, torno horizontal o torno de puntos. Está formado por numerosos componentes [6] [17], como se muestra en la *figura 15*:

- **Bancada:** Esta parte es común a todas las máquinas-herramientas de los distintos procesos de mecanizado. Sirve para el apoyo del resto de componentes. Normalmente están hechos de fundición. En su parte superior se encuentran las guías sobre las que se moverá el carro portaherramientas y el contrapunto (o cabezal móvil). Se les aplica un temple y un rectificado para evitar su desgaste.
- **Cabezal fijo:** En él nos podemos encontrar el husillo principal, que es el encargado de dar a la pieza el movimiento de rotación. El husillo normalmente está fabricado de un acero tratado. Es la pieza que más esfuerzos y tensiones sufre. En su extremo delantero (la cabeza del husillo) lleva un cono Morse interior para adaptar el punto que se usa en el torneado entre puntos. Además nos encontramos con la caja, donde se apoya el husillo a través de una serie de rodamientos.
- **Sistema de accionamiento:** Consta de dos partes, la caja de velocidades y el motor.
 - **Caja de velocidades:** Se encuentra dentro del armazón antes descrito. En la caja de velocidades están las palancas o accionamientos que seleccionan las velocidades a las que gira el husillo. Puede ser de conopolea (ya en desuso), una caja de trenes de engranajes (el más usado) o un sistema de variadores de velocidad mecánicos. Este último nos permite una variación de velocidad progresiva sin saltos, además que puede ser accionado mientras el torno funciona (no como en los otros dos sistemas).
 - **Motor:** Es el encargado de suministrar la energía al torno. Normalmente se utilizan motores eléctricos. Pueden ser de corriente alterna con o sin regulación o de corriente continua.
- **Carro portaherramientas:** Es el encargado de sujetar la herramienta de corte, además de proporcionarle los movimientos de avance y penetración. En un torno paralelo hablamos de un carro cruzado compuesto por un carro principal (se desliza sobre la bancada), por un carro transversal (se desplaza sobre el principal) y por un carro orientable (apoyado sobre el transversal).
- **Contrapunto o cabezal móvil:** Es un elemento de sujeción para mecanizado de piezas largas. Tiene dos partes: la primera que desliza sobre la bancada y la segunda que se mueve transversalmente sobre la primera. Cuenta también con un husillo que permite el movimiento del contrapunto en dirección longitudinal.
- **Sistemas auxiliares:** Como el sistema de refrigeración, de engrase, eléctrico o los elementos de seguridad.

- **Útiles de sujeción:** Cumplen con las funciones de mantener amarrada la pieza mientras se mecaniza y de transmitirle el giro desde la máquina. Dependiendo de la forma y las dimensiones de la pieza a mecanizar se usan útiles de sujeción distintos: platos de garras, contrapunto, lunetas o platos lisos.

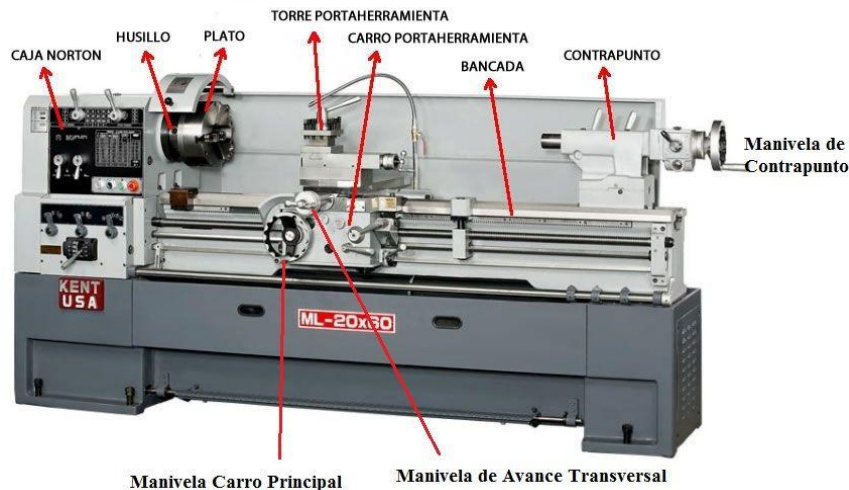


Figura 15. Partes de un torno paralelo [16]

2.1.3.1.2. Trabajos en el torno

Como se dijo anteriormente, el torneado es el proceso de mecanizado más utilizado actualmente en la industria. Esto es así debido a la gran cantidad de trabajos que se pueden realizar en un torno. Las operaciones pueden hacerse tanto en el exterior como en el interior de la pieza. Hay que tener en cuenta las vibraciones y la flexión de la pieza, producidas por las fuerzas generadas durante el corte. Podemos destacar como trabajos principales [7]:

- **Refrentado:** Se mecanizan planos perpendiculares al eje del husillo, moviendo la herramienta con el carro transversal. Esta operación se realiza en prácticamente todas las piezas que se tornean, ya que sirve para modificar su diámetro. Lo ideal es realizarlo a velocidad de corte constante, por lo que hay que contar con una máquina de control continuo sobre la velocidad de giro.
- **Cilindrado y mandrinado:** Se consiguen superficies rectas moviendo la herramienta de forma paralela al eje del husillo. Si el cilindrado se realiza en el interior de la pieza se conoce como mandrinado. El proceso del proyecto se corresponde con un cilindrado, pero, al tener una profundidad de corte muy baja se le llama acabado superficial.
- **Torneado cónico:** Como su propio nombre indica, sirve para dar formas cónicas a la pieza. Para ello se tiene que mover la herramienta en la dirección de la generatriz del cono deseado. Hay tres maneras distintas de hacerlo:

- Inclinando el carro portaherramientas, que es orientable. Se utiliza un accionamiento manual, por lo que se usa poco este método.
- Mediante movimientos longitudinal y transversal simultáneos, utilizando un torno de control numérico.
- Mediante una herramienta inclinada. Solo sirve si el cono es corto, de dimensiones inferiores al filo.
- **Torneado de formas:** También conocido como copiado. Se consiguen diversas curvas. Se puede realizar con herramientas de forma, con movimiento simultáneo del carro longitudinal y transversal (en tornos de control numérico) o mediante un aparato copiador que se apoya en una pieza patrón. Este último método está en desuso.
- **Roscado:** Se consiguen roscas mediante distintos procedimientos:
 - **Con macho de roscar:** Para roscas interiores de pequeño tamaño. La pieza gira a la mínima velocidad posible, mientras que el avance del macho es automático al iniciarse la rosca.
 - **Con terraaja:** Se usa para roscas exteriores pequeñas. El procedimiento es el mismo que en el caso del macho de roscar.
 - **Con cabezal de peines:** Los peines se abren cuando finaliza el roscado.
 - **Con rodillos de laminación:** Este procedimiento tiene como ventaja que no se genera viruta, además que las fibras del material adoptan la forma de la rosca.
 - **Con cuchilla:** El perfil de la cuchilla se corresponde con el de la rosca. A diferencia de todos los métodos anteriores, en este hay que realizar varias pasadas. Se utiliza un husillo de roscar para sincronizar el giro del husillo principal con el movimiento de la herramienta.
- **Tronzado y ranurado:** Con el tronzado se separa la pieza deseada de la barra inicial de materia prima, mediante el desplazamiento de la herramienta en el carro transversal hasta el eje de giro de la pieza. Las herramientas utilizadas son de muy poco espesor y largas, por lo que es muy fácil que se rompan. El ranurado es muy similar, solo que no se llega a cortar hasta el eje de giro de la pieza.

- **Taladrado y escariado:** Se realizan girando la pieza y desplazando la herramienta, que no gira. En un torno paralelo solo se pueden realizar si el eje del taladro coincide con el de giro de la pieza. El escariado es un proceso análogo al taladrado, en el que se consiguen agujeros de precisión dimensional y buen acabado superficial.

2.2. Inconel 718

El Inconel 718 es una súperaleación austenítica de base níquel-cromo. Fue creada en 1959 por la compañía “International Nickel”, que posteriormente fue absorbida por “Special Metals Corporations”; de la cual actualmente Inconel 718 es una marca. En aquella época supuso una novedad la inclusión de niobio, que sirve como endurecedor del material a elevadas temperaturas [19].

El níquel es el elemento que forma la estructura austenítica gamma cúbica centrada en las caras. Esta forma cristalográfica es la que proporciona una gran resistencia mecánica y a la corrosión a elevadas temperaturas [20]. La resistencia a la oxidación se debe a la presencia de cromo. Para estabilizar la microestructura austenítica y evitar que el cromo precipite en forma de carburos se otros elementos en menor proporción, como Nb, Mo, W, B, V y Al.

Gracias a sus excelentes cualidades su uso se ha extendido rápidamente. Actualmente el 35% de la producción de este tipo superaleaciones se corresponde con el Inconel 718.

Debido a la combinación de níquel y cromo este tipo de aleaciones presentan resistencia a la corrosión en disoluciones reductoras y oxidantes. Además podemos destacar su resistencia a la tracción y fatiga bajo temperaturas moderadas junto con excelentes propiedades mecánicas y químicas a altas temperaturas.

2.2.1 Composición del Inconel 718

La composición química del Inconel 718 viene detallada en la *tabla 3*:

Elemento	%
Ni	50.00-55.00
Cr	17.00-21.00
Fr	*
Nb	4.75-5.50
Mo	2.80-3.30
Ti	0.65-1.15

Al	0.20-0.80
Co	1.00 máx.
C	0.08 máx.
Mn	0.35 máx.
Si	0.35 máx.
P	0.015 máx.
S	0.015 máx.
B	0.006 máx.
Cu	0.3 máx.

Tabla 3. Composición química del Inconel 718 [21]

Cada elemento partícipe en la composición del Inconel 718 tiene una función determinada [22]:

- **Carbono (0.08% máx.):** Puede formar carburos metálicos, como con el Ti y el Nb. Está presente en muy pequeñas cantidades para no reducir las cantidades de Nb y de Ti libres, que forman las fases γ' y γ'' .
- **Níquel (50.00-55.00%):** Proporciona buena resistencia a la corrosión a altas temperaturas.
- **Cromo (17.00-21.00%):** Del mismo modo que el níquel, aumenta la resistencia a la corrosión en caliente.
- **Molibdeno (2.80-3.30%):** Aumenta la resistencia mecánica en la matriz.
- **Niobio (4.75-5.50%):** Forma precipitados endurecedores γ' .
- **Titanio (0.65-1.15%) y Aluminio (0.20-0.80%):** Forman precipitados γ' , los cuales son endurecedores menos importantes que los precipitados γ'' .

2.2.1.1. Fases en el Inconel 718

Se conoce como fase a cada una de las zonas macroscópicas de un compuesto químico con unas propiedades físicas y químicas homogéneas, que forman un determinado sistema [23]. Si este sistema es monofásico se llama homogéneo, y si está formado por varias fases se llama heterogéneo.

Una vez definido el concepto de fase, se detallan las principales fases que nos podemos encontrar en el Inconel 718 [24]:

- **Matriz γ :** Tiene estructura FFC. Tiene distintos niveles de Al, Ti y Nb en función del tratamiento térmico que se le aplique.
- **Precipitados γ' :** Está formado por $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ con una estructura FCC. Es una fase que endurece el material, propia de la mayoría de las aleaciones de base Ni. Su forma puede ser esférica o cúbica, con tamaños que oscilan entre los 10 nm a los 40 nm. Hay veces en las que también el Nb está presente. Pueden formarse a temperaturas aproximadas entre 550° y 660° para envejecimientos largos y 700° y 900° para envejecimientos cortos.
- **Precipitados γ'' secundarios:** Son la principal fase de endurecimiento del Inconel 718. Se forman a las mismas temperaturas que los precipitados γ' , siendo la cantidad de Nb mayor. Su forma y tamaño también son iguales, mientras que su composición es Ni_3Nb con estructura BCT ordenada coherente con la matriz.
- **Precipitados γ'' primarios:** Pueden aparecer después de un tratamiento térmico a 870°. Tienen una estructura BCT ordenada. Tienen forma lenticular con un tamaño que ronda los 0.3 μm . Se forman después de los precipitados δ .
- **Precipitados δ :** Se forman de la misma manera que los precipitados γ'' a 870°, pero previamente a la formación de estos. Pueden presentar forma globular con un tamaño de 1 μm o de aguja con tamaños entre 1 y 8 μm . Su composición es Ni_3Nb con estructura ortorrómbica.
- **Carburos MC:** Su estructura es cúbica, mientras que su composición presenta altos niveles de Ti y Nb; siendo esta $(\text{TiNb})\text{C}$. Su tamaño está entre 0.5 y 1 μm . Se forma durante la solidificación o el recocido a 1038°.
- **Precipitados Laves:** Su estructura es cristalina hexagonal. Su composición es $(\text{Ni}_{0,5}\text{Fe}_{0,25}\text{Cr}_{0,25})(\text{NbMoSi})$. Se forman igual que los carburos MC. Su forma es globular aunque a veces pueden ser alargados. Presentan varios problemas, como que pueden retirar Nb de la matriz (lo que implica pérdida de endurecimiento por precipitación de la fase γ''), su punto de fusión es más bajo que el de la matriz (lo que supone fusión localizada) y es el tipo de precipitado más débil (se inician roturas cuando el material está bajo sometimiento de tensiones).

2.2.2. Propiedades del Inconel 718

Gracias a su composición podemos decir que el Inconel 718 tiene excelentes propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, a la ruptura y a las altas temperaturas. Las propiedades físicas del Inconel 718 quedan recogidas en la *tabla 4*:

PROPIEDADES	VALOR
DENSIDAD [kg/m ³]	8190
CONDUCTIVIDAD [W/m*k]	11.2
MÓDULO DE YOUNG [GPa]	200
COEFICIENTE DE POISSON	0.284
COEFICIENTE DE EXPANSIÓN [1/K]	13.0*10 ⁻⁶
CALOR ESPECÍFICO [J/kg*K]	435
TEMPERATURA DE FUSIÓN [K]	1533-1608
DUREZA BRINELL	250-410

Tabla 4. Propiedades físicas del Inconel 718 [25] [26]

2.2.3. Aplicaciones del Inconel 718

Como se dijo anteriormente, el Inconel 718 se usa en las industrias más avanzadas y exigentes. Dadas las propiedades ya citadas se suele usar para aquellos requerimientos en los que el material estará sujeto a altas tensiones y temperaturas.

Podemos encontrarlo en la industria aeroespacial para motores de cohetes, como el Falcon 9, así como en la industria automovilística en el caso del Tesla Model S [27]. Se utiliza también en la industria petrolífera, en reactores nucleares y en la fabricación de válvulas, tornillos, mandriles y componentes de motores de turbina de gas [28].

CAPÍTULO III

3. Modelizado del mecanizado en 3D aplicado al Inconel 718

En este capítulo se habla sobre cómo se ha implementado el cálculo utilizado para resolver las simulaciones numéricas. En dichas simulaciones se han mantenido una serie de variables fijas y se han modificado otras para ver su impacto en los resultados. Por otra parte, se especifica el modelo numérico empleado y se explica brevemente la ley constitutiva implementada en él. Dicha parte de la memoria no ha sido objeto del proyecto, pero se incluye para mayor comprensión del mismo.

3.1. Consideraciones básicas sobre el modelo

En algunos casos, para lograr una mayor simplicidad del modelo, se recurre a una representación en 2D. Esto puede ser arriesgado pues una mala simplificación, o bajo ciertas suposiciones, puede implicar una distorsión tal de los resultados capaz de invalidarlos. En nuestro caso, para lograr mayor profundidad en el estudio, realizamos un modelo 3D.

Para calcular la simulación el software (ABAQUS) discretiza el sólido en cuestión mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF). La discretización mencionada se lleva a cabo mediante una malla. En esta malla encontramos los elementos y los nodos. Distintos elementos comparten unos mismos nodos. Es en estos nodos donde ABAQUS hace los cálculos necesarios. La continuidad del proceso de corte se discretiza también mediante distintos frames en los que la herramienta va avanzando.

Una vez se ha realizado el mallado considerado se procede a implementar las condiciones de contorno. Si se ve oportuno se puede realizar una malla más fina en determinadas zonas de interés para conseguir mayor información.

Estas simulaciones por ordenador se corresponden a los llamados métodos numéricos. Dichos métodos nos proporcionan unos resultados muy aproximados a la realidad mientras que se incurre en un esfuerzo y coste mucho menor que los analíticos o reales. Para que los métodos numéricos sean efectivos, necesitamos de una ecuación o ley que nos represente el comportamiento del sistema.

En nuestro caso de estudio el modelo dispone de dos partes principales: la pieza a mecanizar y la herramienta de corte. Es a esta última a la que se le aplica la velocidad de corte.

La herramienta se considera un sólido rígido, por lo que no se deformará. Esto nos será de gran utilidad para estudiar la temperatura de la misma de servicio y la longitud de contacto entre la herramienta y la viruta.

3.2. Mallado

La malla de la pieza a mecanizar está formada por elementos cuadrangulares. Se pueden distinguir varias partes (ver *figura 16*). La primera se corresponde a la zona en la que se formará viruta, de una profundidad de $60\text{ }\mu\text{m}$. Los elementos que la conforman son cuadrados de $10\text{ }\mu\text{m}$ de lado. En la parte más baja de la pieza nos encontramos con una zona de características semejantes, solo que algunos nodos presentan un tamaño mucho mayor ya que no aportan información útil y su afinamiento solo aumentaría el tiempo de cálculo.

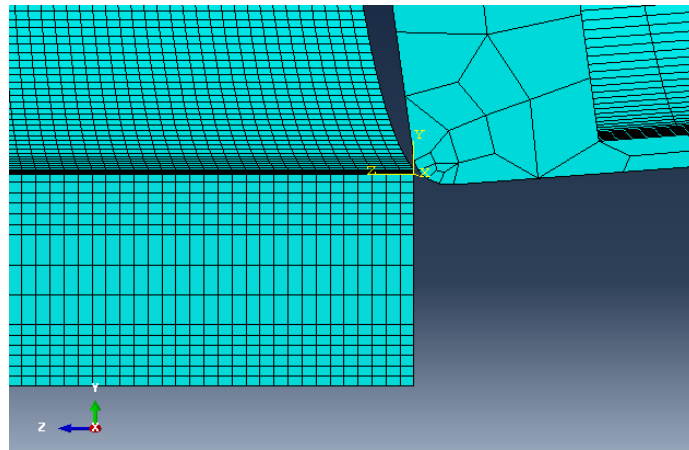


Figura 16. Zonas del mallado

Como algunas caras perpendiculares a la superficie mecanizada tienen aristas curvas semejantes a una hipérbola, algunos de los elementos contenidos en ella presentarán formas irregulares e incluso curvas. Los nodos distorsionados de la zona más baja son aún más irregulares que los de zonas superiores debido a su mayor tamaño. Esto se muestra en la *figura 17*.

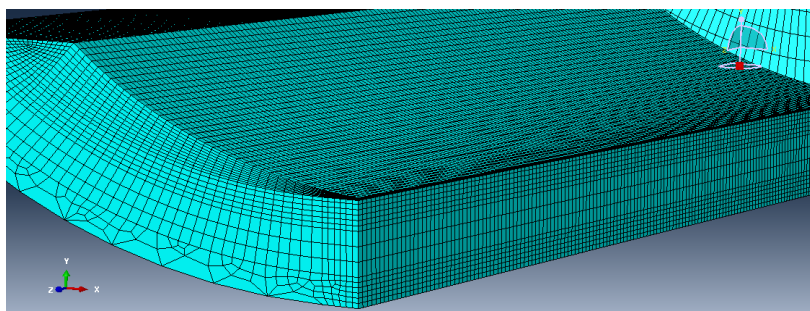


Figura 17. Distintas caras del mallado de la pieza

El conjunto del mallado de la pieza se muestra en la *figura 18*. En la parte de la izquierda se ve una franja de elementos de mayor tamaño que los de su alrededor. Se han diseñado así para mantener la regularidad de la malla y al mismo tiempo acoplar los elementos de las distintas caras de la pieza.

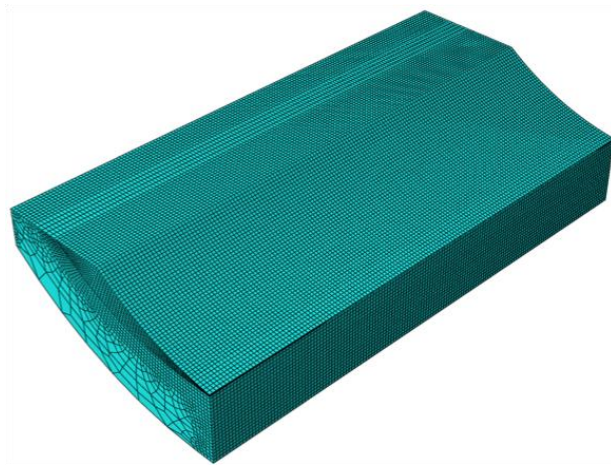


Figura 18. Mallado de la pieza

El mallado de la herramienta de corte también está compuesto por elementos cuadrangulares. Dichos elementos son rectángulos regulares de $60\ \mu\text{m}$ por $20\ \mu\text{m}$. Del mismo modo que con la pieza, en la herramienta hay elementos que se distorsionan debido a las curvas de la herramienta, como algunas de sus aristas o el filo.

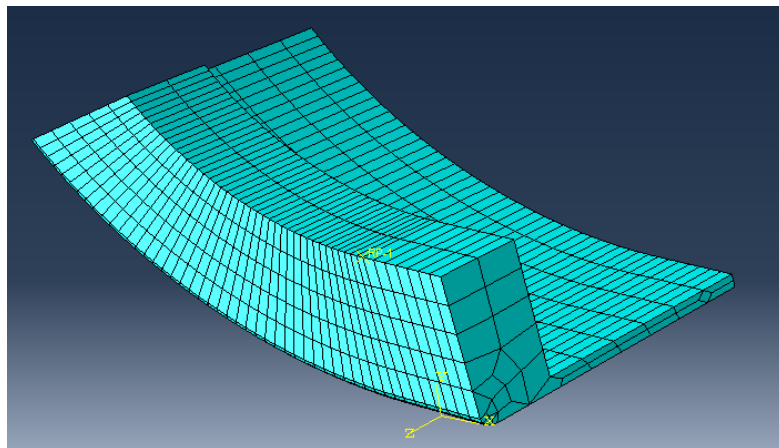


Figura 19. Mallado de la herramienta

3.3. Geometría de corte, parámetros de corte y condiciones de contorno

El ángulo de desprendimiento es $\gamma = -6^\circ$, el de incidencia es $\alpha = 7^\circ$. El avance es de $a = 0.15\ \text{mm}$, mientras que la profundidad de corte será $p = 0.15, 0.25$ o $0.50\ \text{mm}$. El coeficiente de fricción es $\mu = 0.25$. La pieza está empotrada en toda su parte baja, lo que impide movimientos en cualquier dirección y giros; mientras que a la herramienta solo se le permite movimiento lineal en la dirección de corte.

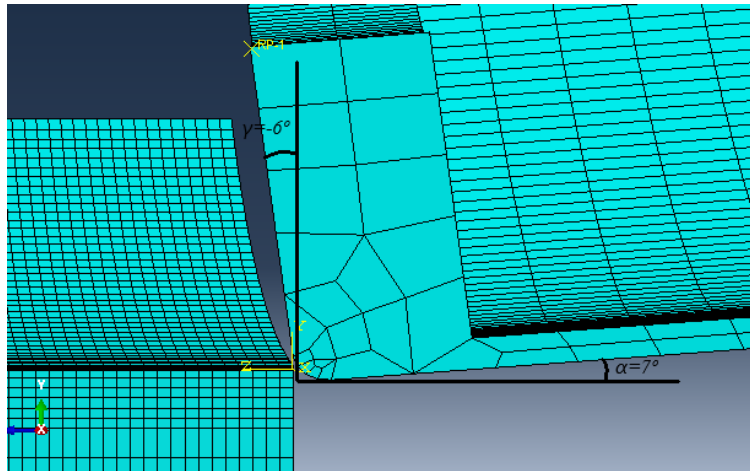


Figura 20. Ángulos de corte

La velocidad de corte es de 300 m/min (5000 mm/s). El tiempo de corte se define como $T_c = L_c / V_c$, siendo L_c la longitud de corte y V_c la velocidad de corte. La longitud de corte es todo el largo de la pieza, de 1.5 mm, con lo que se tiene:

$$T_c = \frac{L_c}{V_c} = \frac{1.5 \text{ mm}}{5000 \frac{\text{mm}}{\text{s}}} = 0.0003 \text{ s}$$

3.4. Ley de comportamiento

Como se dijo al principio del capítulo, en los métodos numéricos es necesaria una ley o ecuación que represente el comportamiento del sistema. En este estudio se ha utilizado la ley de Johnson-Cook que viene definida en ABAQUS. Es una ecuación que relaciona la tensión efectiva de Von Mises σ con la deformación efectiva ε .

Esta ley es posiblemente el modelo termoviscoplastico más utilizado en los códigos de simulación numérica para el MEF. Se utiliza sobre todo en aquellos problemas en los que el material sufre altas velocidades de deformación, como mecanizados, ensayos balísticos o conformados rápidos.

Dicha ley es:

$$\sigma = [A + B \cdot \varepsilon^n] \left[1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{ref}} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_f - T_{ref}} \right)^m \right]$$

Donde cada término es:

- **A:** Límite elástico
- **B:** Coeficiente de endurecimiento por deformación
- **N:** Exponente de endurecimiento por deformación

- **C**: Sensibilidad del material a la velocidad de deformación
- **m**: Sensibilidad del material a la temperatura
- **T**: Temperatura
- **T_{ref}**: Temperatura de referencia (293K en nuestro caso)
- **T_f**: Temperatura de fusión
- **ε**: Deformación plástica a cortadura equivalente
- $\dot{\epsilon}$: Velocidad de deformación
- $\dot{\epsilon}_{ref}$: Velocidad de deformación equivalente

Se ha impuesto que el material se romperá (un elemento se separa por sus nodos) si se alcanza un determinado valor de deformación de cizalladura ($\epsilon/3^{1/2}$). Este valor dependerá de la zona en la que nos encontremos: será de 2 para la base de la pieza o de 4 en la viruta.

Se ha utilizado Inconel 718 para la pieza y un acero genérico para la herramienta de corte. Las propiedades de los materiales en la simulación se muestran en la *tabla 5*. Es posible que algunas propiedades del Inconel 718 no coincidan con las teóricas mostradas en la *tabla 4*, ya que pueden verse modificadas por distintos factores, como una composición ligeramente distinta.

Propiedades	Pieza mecanizada	Herramienta de corte
Material	Inconel 718	Acero
Densidad [kg/m³]	8200	7850
Conductividad [W/m*K]	12	52
Módulo de Young [Gpa]	217	210
Coefficiente de Poisson	0.3	0.3
Coefficiente de expansión térmica [1/K]	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-6}$
Calor específico [J/kg*K]	435	460.5

Tabla 5. Propiedades de la pieza y de la herramienta de corte

CAPÍTULO IV

4. Estudio propio

Este capítulo trata sobre el trabajo personal del proyecto. Se profundizará en la metodología de trabajo, se expondrán los resultados y se hará una síntesis de ellos. Tiene como finalidad comprobar el impacto de unos valores sobre distintas variables locales.

4.1 Aspectos generales, metodología y zonas de trabajo

En este trabajo se estudia el impacto que tiene la profundidad de corte y el “shear deletion” sobre distintas variables locales: la temperatura, deformación equivalente y velocidad de deformación en la viruta; la temperatura de servicio de la herramienta y la longitud de contacto viruta-herramienta. El “shear deletion” es un valor máximo de deformación plástica a cortadura que un elemento no puede sobrepasar. Si un elemento llega a este valor de “shear deletion” o lo supera, es eliminado (ver *figura 1*). Se tienen tres profundidades de corte (0.15, 0.25 y 0.50 mm) y dos valores de “shear deletion” (4 y 6), por lo que se tienen un total de seis simulaciones sobre las que se trabaja.

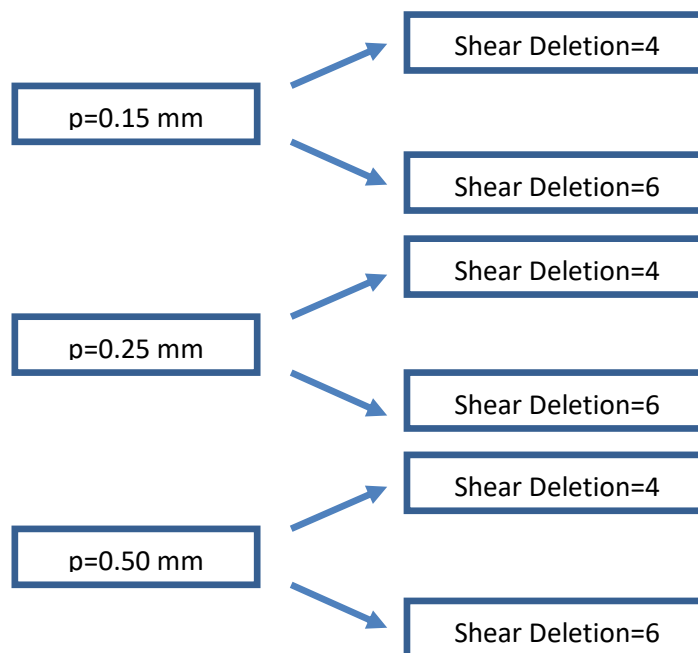


Figura 21. Esquema de las simulaciones

Como se dijo anteriormente, se distinguen distintas zonas de trabajo de las que se sacan los datos numéricos. Las zonas de trabajo varían en función de dónde esté la variable que se esté estudiando, si en la viruta o en la pieza. Estas zonas mantendrán fijas sus características para que todos los datos partan de unas mismas condiciones. Todos los datos se han tomado una vez las fuerzas de corte se han estabilizado para que los resultados obtenidos sean constantes igualmente. Independientemente de en qué zona de trabajo nos encontremos los datos se obtendrán de los nodos. Como no se sabe la distribución que tomarán los datos, se presentarán sus valores medios y máximos en distintas tablas y se graficarán los valores medios.

En la viruta tenemos un total de cuatro zonas: tres en la cara interna o zona primaria de cizallado (donde se empieza a generar viruta) y una cuarta en la cara externa. Estas tres primeras tienen forma rectangular de 0.17×0.08 mm aproximadamente, que se mantendrán fijas para todas las simulaciones. Se las llamará a partir de ahora “izquierda”, “centro” y “derecha”.

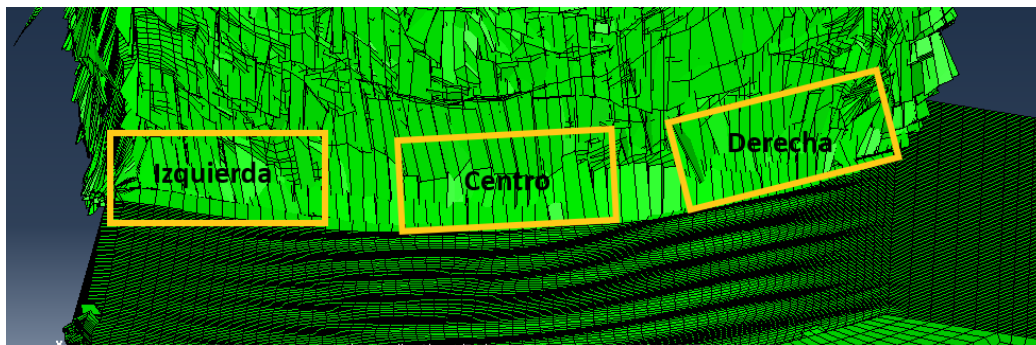


Figura 22. Zonas de trabajo en la cara interna de la viruta

Por otra parte, las zonas de trabajo en la cara externa de la viruta y en la herramienta de trabajo no serán siempre iguales; si no que mantendrán la condición de ajustarse al perfil que formen los valores más altos de la variable a estudiar. En el caso de la cara externa de la viruta se le llamará “frontal”. Se estudiará cada zona de independientemente, es decir, no se compararán datos de la zona derecha con la izquierda, por ejemplo.

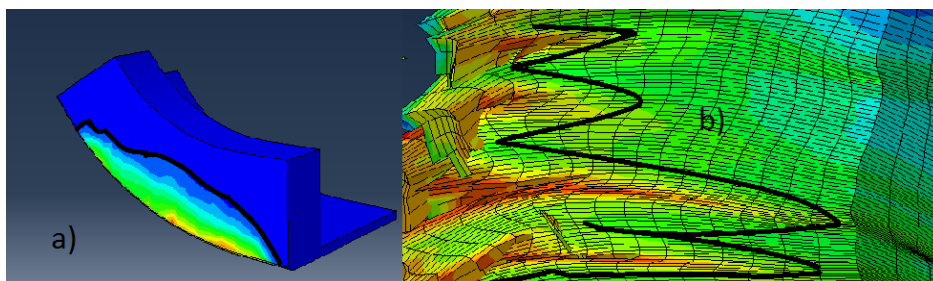


Figura 23. Zonas de trabajo según los perfiles: a) superficie de desprendimiento de la herramienta de corte, b) cara externa de la viruta

4.2. Estudio de la deformación equivalente (PEEQ) en la viruta

La deformación equivalente aparece bajo el nombre de PEEQ en ABAQUS. Es una variable escalar y no presenta unidades. Esta variable local se estudia en la viruta, tanto en la cara interna como en la externa. PEEQ hace referencia a la deformación equivalente de la tensión de Von Mises, por lo que puede tomar valores más altos que el “shear deletion” (recordar que se ciñe a la deformación plástica a cortadura).

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos de las distintas simulaciones:

Zona	Profundidad de corte (mm)	Shear Deletion	Media	Máximo
Izquierda	0.15	4	1.20	2.59
		6	1.18	5.9023
	0.25	4	1.86	4.33
		6	1.32	6.98
	0.50	4	1.30	4.07
		6	1.55	7.84

Tabla 6. Resultados de PEEQ en la zona "izquierda"

Zona	Profundidad de corte (mm)	Shear Deletion	Media	Máximo
Centro	0.15	4	1.00	4.67
		6	1.29	9.55
	0.25	4	1.94	4.71
		6	1.19	8.96
	0.50	4	1.10	3.24
		6	3.43	10.90

Tabla 7. Resultados de PEEQ en la zona "centro"

Zona	Profundidad de corte (mm)	Shear Deletion	Media	Máximo
Derecha	0.15	4	1.37	4.18
		6	1.74	8.63
	0.25	4	1.97	5.18
		6	1.18	9.60
	0.50	4	1.11	3.13
		6	2.29	8.18

Tabla 8. Resultados de PEEQ en la zona "derecha"

Zona	Profundidad de corte (mm)	Shear Deletion	Media	Máximo
Frontal	0.15	4	1.84	2.16
		6	1.33	2.96
	0.25	4	2.24	4.90
		6	1.92	8.80
	0.50	4	2.04	5.61
		6	1.76	8.94

Tabla 9. Resultados de PEEQ en la zona "frontal"

A continuación se muestran graficados los valores medios separados por zonas de trabajo:

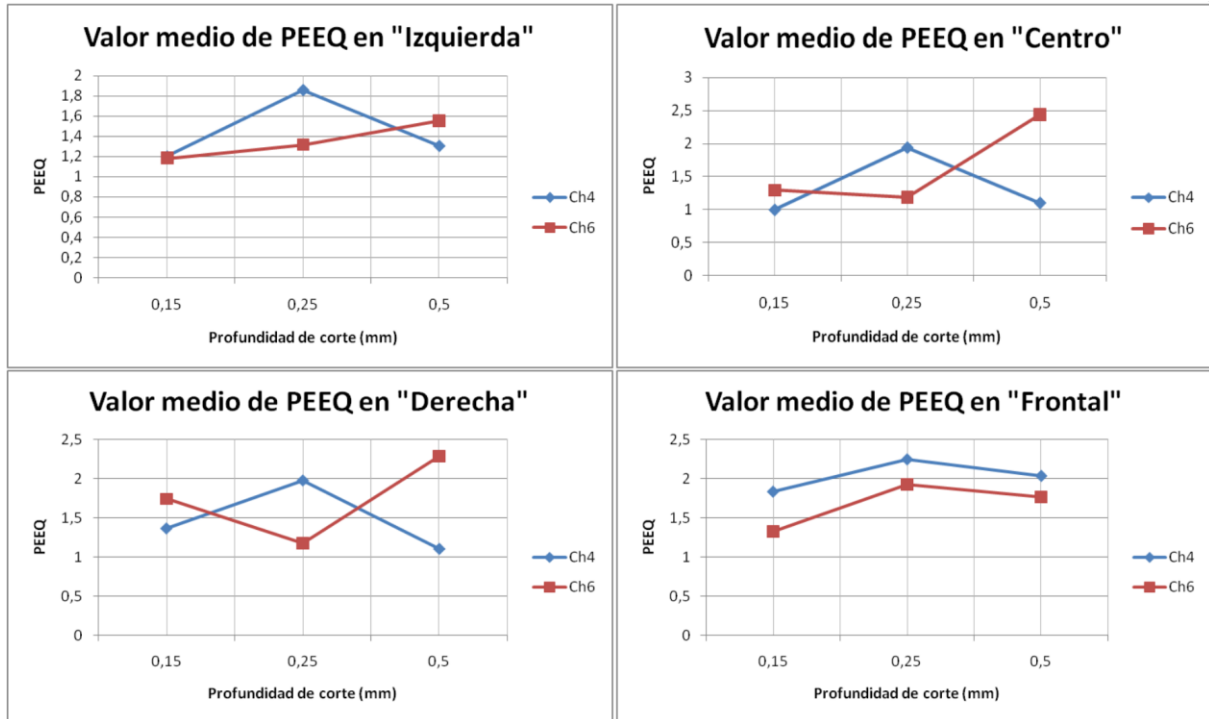


Figura 24. Valores medios de PEEQ graficados según sus zonas de trabajo

En un principio no se puede decir que haya influencia directa entre el “shear deletion” y el PEEQ, ya que no siempre siguen el mismo comportamiento y no hay una diferencia clara. Únicamente se aprecia una tendencia creciente de PEEQ con la profundidad de corte en la zona “frontal”, independientemente del valor de “shear deletion”.

Las zonas más extremas (“derecha” e “izquierda”) presentan gran variabilidad en los resultados, ya que algunos elementos se deforman mucho y otros muy pocos. Estas variaciones en la deformación equivalente (PEEQ) afectarán al resto de variables locales estudiadas en la viruta: la temperatura y la velocidad de deformación.

Las zonas “izquierda”, “derecha” y “centro” se encuentran en la llamada zona primaria de cizallado, donde el “shear deletion” puede afectar a su ancho. Esto puede alterar el número de elementos con valores muy altos o bajos, afectando significativamente a los valores medios. Por estos motivos se cree más conveniente trabajar con los valores máximos.

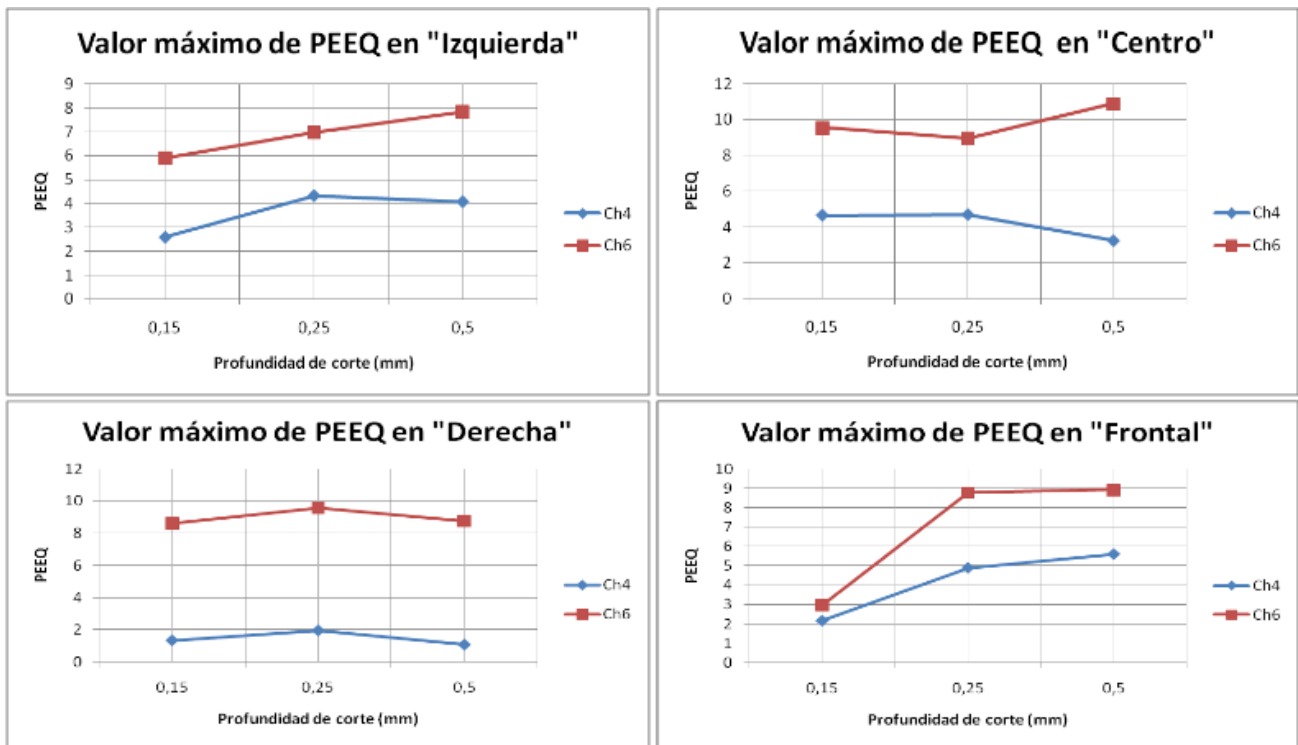


Figura 25. Valores máximos de PEEQ graficados según sus zonas de trabajo

Con los valores máximos sí se ve una clara diferencia entre el “shear deletion” de 4 y de 6. Nos encontramos con unas diferencias de PEEQ de entre 3.5 y 7. Como era esperable, las deformaciones con un “shear deletion” de 6 son mayores que con 4, pues estamos dejando deformarse más el material antes de eliminar elementos. Por otra parte los valores máximos se mantienen relativamente constantes salvo en el caso de la zona “frontal”, donde tiene una clara tendencia alcista.

4.3. Estudio de la temperatura (TEMP) en la viruta

La variable temperatura la podemos encontrar en ABAQUS por el nombre de TEMP. Podemos encontrar dos fuentes principales de calor que hacen que la temperatura se eleve: la fricción con la herramienta de corte y la energía empleada en la deformación. Como la deformación juega un papel importante es esperable que la variable TEMP siga un comportamiento semejante a la variable PEEQ. A continuación se tabulan los resultados obtenidos de las simulaciones y se grafican los valores medios.

Zona	Profundidad de corte (mm)	Shear Deletion	Media (K)	Máximo (K)
Izquierda	0.15	4	755.04	1124.29
		6	635.04	995.77
	0.25	4	897.44	1361.49
		6	709.34	1201.14
	0.50	4	738.61	1147.11
		6	853.60	1229.31

Tabla 10. Resultados de TEMP en la zona "izquierda"

Zona	Profundidad de corte (mm)	Shear Deletion	Media (K)	Máximo (K)
Centro	0.15	4	711.31	1216.65
		6	529.70	919.02
	0.25	4	1102.68	1449.66
		6	669.37	1388.68
	0.50	4	726.94	920.19
		6	1209.60	1532.55

Tabla 11. Resultados de TEMP en la zona "centro"

Zona	Profundidad de corte (mm)	Shear Deletion	Media (K)	Máximo (K)
Derecha	0.15	4	759.62	1341.91
		6	878.72	1586.55
	0.25	4	1060.97	1438.14
		6	702.80	1481.00
	0.50	4	708.58	1190.44
		6	1124.41	1701.33

Tabla 12. Resultados de TEMP en la zona "derecha"

Zona	Profundidad de corte (mm)	Shear Deletion	Media (K)	Máximo (K)
Frontal	0.15	4	1021.04	1195.57
		6	900.79	1361.56
	0.25	4	1224.75	1468.59
		6	1253.69	1569.97
	0.50	4	1007.01	1288.81
		6	941.08	1624.85

Tabla 13. Resultados de TEMP en la zona "frontal"

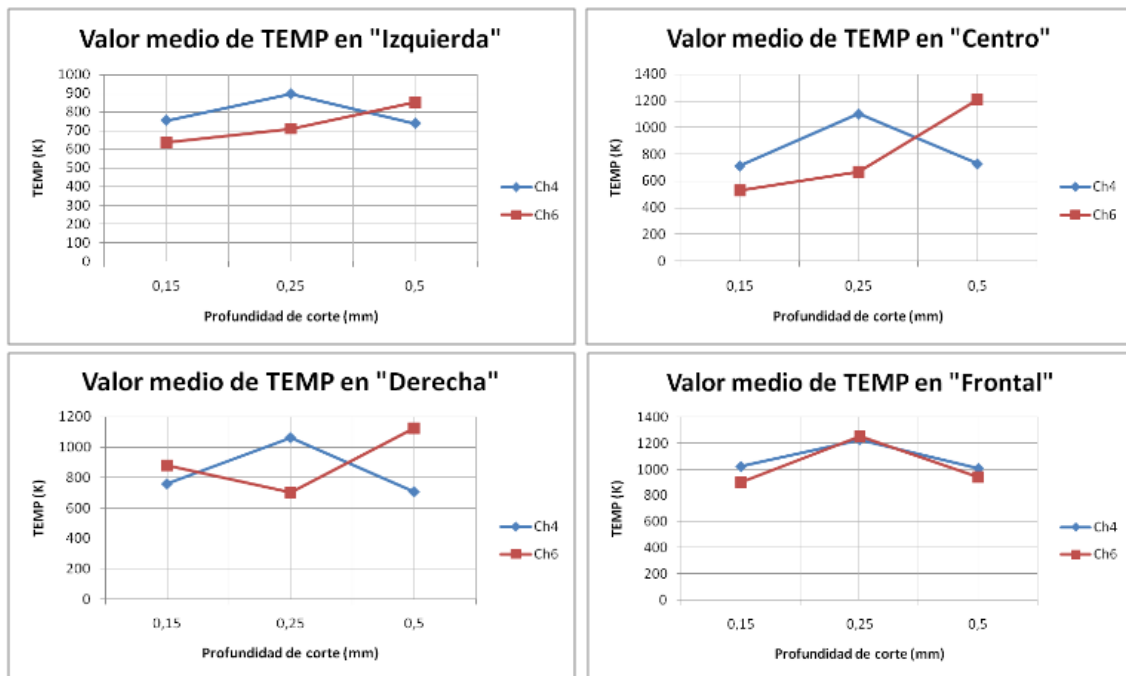


Figura 26. Valores medios de TEMP graficados según sus zonas de trabajo

Efectivamente vemos que el perfil que siguen los valores medios de las temperaturas es muy similar al que sigue la deformación equivalente. Se vuelve a apreciar una gran variación en los datos entre las zonas más extremas de la zona primaria de cizallado (las zonas conocidas como “derecha” e “izquierda”). Del mismo modo que pasaba con PEEQ estas variaciones vienen dadas por el “shear deletion”. Para poder tener unas conclusiones válidas se vuelven a estudiar los valores máximos.

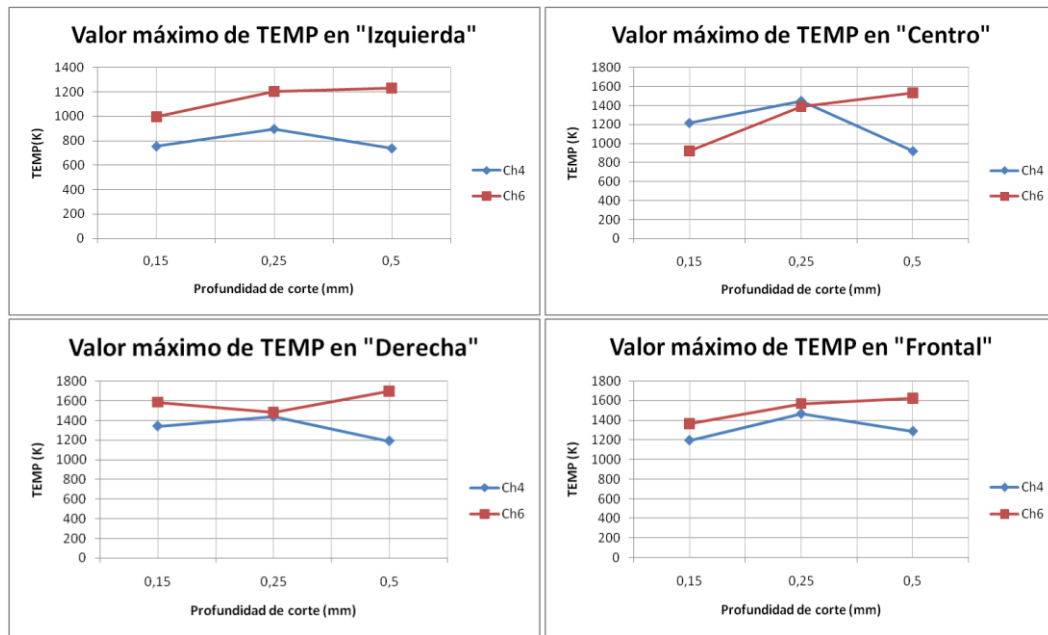


Figura 27. Valores máximos de TEMP graficados según sus zonas de trabajo

En el caso de los valores máximos en las temperatura casi no hay diferencia entre un “shear deletion” de 4 y de 6. La única zona donde está clara es en “izquierda” (con diferencias de entre 200K y 450K aproximadamente); mientras que en “derecha” y “frontal” a algunas profundidades es inexistente. Además en “centro” no hay relación alguna.

Por otra parte únicamente se aprecia que la temperatura crezca con la profundidad de corte con un “shear deletion” de 6. Esto tiene sentido pues al dejar deformar más el material estaremos convirtiendo más energía de deformación en energía térmica que pasa a elevar la temperatura de la viruta. Aún así, el único incremento significativo se da en la zona “centro” con un valor de 500K, mientras que en el resto de zonas apenas es de 200K.

4.4. Estudio de la velocidad de deformación (ER) en la viruta

La velocidad de deformación (llamada ER en ABAQUS) es una magnitud que nos indica con qué velocidad se está deformando una determinada partícula de un sólido. Se mide en s^{-1} . Los resultados que se obtengan en este apartado son de especial interés, pues unos valores muy altos de velocidad de deformación implicarían que la ley de Johnson-Cook no reproduce bien el comportamiento del material.

Se ha tenido especial cuidado a la hora de obtener los datos de la velocidad de deformación. Su valor en un nodo varía enormemente de un frame a otro. Así pues, para mantener las mismas condiciones de partida de todos los datos, se ha escogido en cada simulación un frame en el que la herramienta hubiese recorrido la misma distancia. Se muestran a continuación los resultados medidos para la velocidad de deformación y los valores medios graficados.

Zona	Profundidad de corte (mm)	Shear Deletion	Media (s^{-1})	Máximo (s^{-1})
Izquierda	0.15	4	57853.35	879737.00
		6	38956.19	203658.00
	0.25	4	80320.75	294270.00
		6	57450.11	242862.00
	0.50	4	92069.36	523051.00
		6	73573.21	300320.00

Tabla 14. Resultados de ER en la zona "izquierda"

Zona	Profundidad de corte (mm)	Shear Deletion	Media (s^{-1})	Máximo (s^{-1})
Centro	0.15	4	37135.71	86835.80
		6	29735.59	73723.90
	0.25	4	45295.95	542419.00
		6	32271.85	60734.10
	0.50	4	58066.13	241928.00
		6	62554.10	202768.00

Tabla 15. Resultados de ER en la zona "centro"

Zona	Profundidad de corte (mm)	Shear Deletion	Media (s^{-1})	Máximo (s^{-1})
Derecha	0.15	4	42290.79	174628.00
		6	22213.32	177209.00
	0.25	4	40189.10	95010.70
		6	36134.12	85527.00
	0.50	4	43133.56	119076.00
		6	41020.87	215422.00

Tabla 16. Resultados de ER en la zona "derecha"

Zona	Profundidad de corte (mm)	Shear Deletion	Media (s^{-1})	Máximo (s^{-1})
Frontal	0.15	4	24836.49	40865.40
		6	13755.85	25317.90
	0.25	4	50919.42	86149.50
		6	49078.87	2135240.00
	0.50	4	36105.90	77868.20
		6	34436.47	74043.20

Tabla 17. Resultados de ER en la zona "frontal"

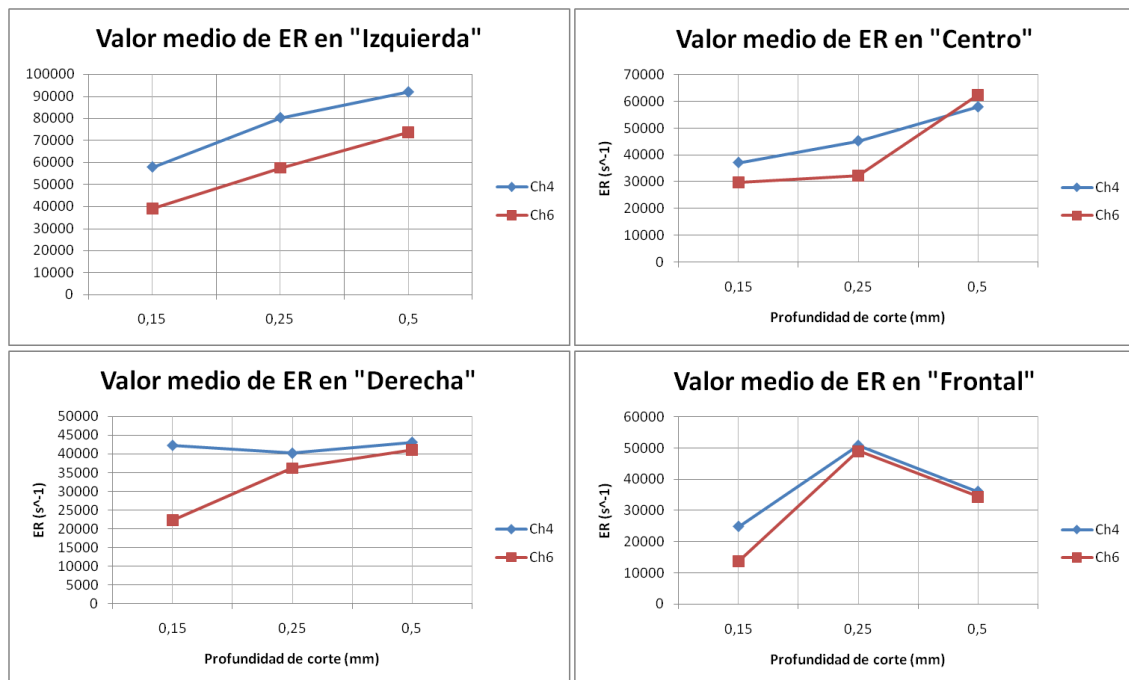


Figura 28. Valores medios de ER graficados según su zona de trabajo

Para la velocidad de deformación los gráficos siguen un perfil más distinto a PEEQ que el caso de TEMP, pero guarda algunas similitudes. A priori parece que se alcanzan valores más altos de ER con un “shear deletion” de 4, aunque no parece una diferencia significativa. Por otra parte se reducen las variaciones entre las zonas extremas. En el caso de “Izquierda” y “Centro” la velocidad de deformación aumenta con la profundidad de corte para cualquier valor de “shear deletion”. En el caso de “Derecha” con “shear deletion” de 4 se mantiene constante con la profundidad de corte, mientras que con “shear deletion” de 6 crece.

A pesar de que se hayan sacado algunas conclusiones se muestran graficados los valores máximos para profundizar el estudio.

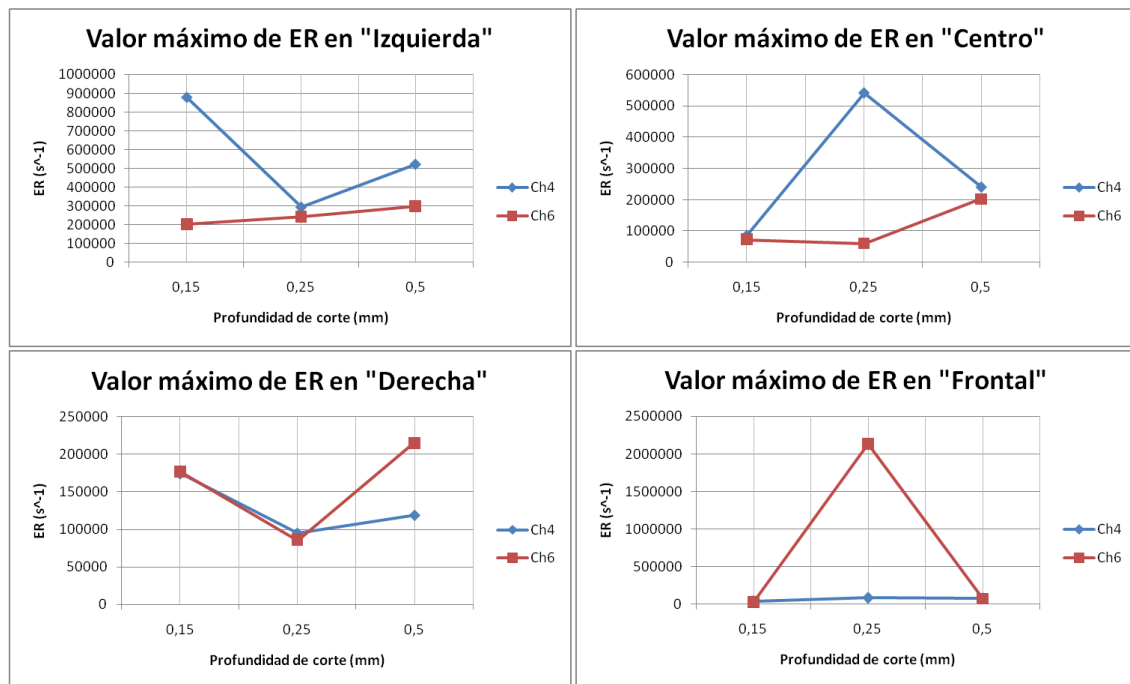


Figura 29. Valores máximos de ER graficados según su zona de trabajo

No se encuentra ninguna relación entre el “shear deletion” y el valor máximo de la velocidad de deformación, pues fijándonos en la *figura 29* en algunos casos es mayor con 4 y en otros con 6. Tampoco se aprecia que haya una relación con la profundidad de corte, aunque se encuentran valores atípicos para 0.25 mm en las zonas “Centro” y “Frontal”.

Al margen de todo esto si se encuentra una conclusión muy importante derivada de los altos valores que toma la velocidad de deformación. Atendiendo a la ley de Johnson-Cook vemos que la tensión varía linealmente con la deformación ($\sigma = C * \ln \epsilon_{pt}$, donde C es la sensibilidad del material a la velocidad de deformación y ϵ_{pt} es el cociente entre la deformación equivalente y la velocidad de deformación equivalente). Sin embargo, a partir de un valor crítico de velocidad de deformación hay un cambio de pendiente muy brusco y pierde esa tendencia lineal. Tenemos valores medios de entre 35000 y 90000 s^{-1} , valores lo suficientemente grandes como para encontrarnos en la zona no lineal de la ley. De este modo podemos asegurar que la ley de Johnson-Cook no es suficiente para describir adecuadamente el comportamiento del material bajo estas velocidades de deformación tan altas.

4.5 Estudio de la longitud de contacto herramienta-viruta

La longitud de contacto entre la herramienta y la viruta generada no aparece como variable dentro de ABAQUS, si no que se ha medido directamente sobre las simulaciones. Se ha medido sobre el perfil de temperaturas que tenemos en la superficie de desprendimiento de la herramienta (ver *figura 23 a*). Es interesante medir esta longitud pues cuanto mayor sea mayor será la fricción y el calor generado. Esto nos

puede causar inconvenientes como mayor energía para el corte y mayor temperatura en la herramienta, que puede causar un deterioro temprano de la misma mediante distintos mecanismos de desgaste.

Como se dijo en el capítulo anterior, se ha considerado la herramienta como cuerpo rígido, por lo que no se deformará. Como es indeformable, no tendremos energía que se disipe en forma de calor y eleve la temperatura de la misma. De esta manera el único flujo de calor que tenemos en la herramienta viene de la viruta; bien por conducción o bien por fricción. Es por este motivo por el que se puede asegurar que el perfil de temperatura en el frame de la medición tendrá la misma morfología que la viruta. El frame en el que se ha medido la longitud de contacto es aquel en el que la viruta empieza a despegarse de la herramienta, como se muestra en la *figura 30*.

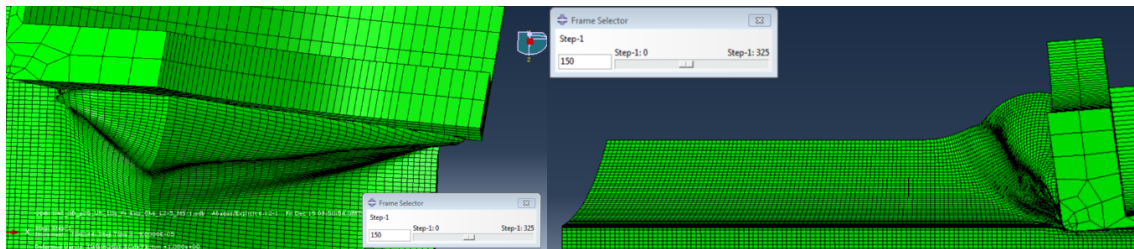


Figura 30. Frame de medición de la longitud de contacto

Una vez seleccionado el frame se mide la longitud sobre el perfil de temperaturas. La longitud de contacto será la mayor longitud ortogonal a la curva de la herramienta hasta el extremo del perfil, como muestran las líneas negras en la *figura 31*.

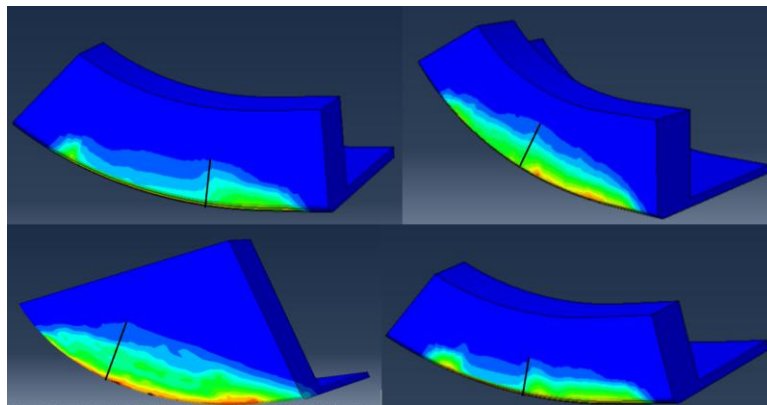


Figura 31. Ejemplos de distintas longitudes de contacto en sus perfiles

A continuación se muestran los valores de la longitud de contacto para cada simulación:

Profundidad de corte (mm)	Shear Deletion	Longitud de contacto (mm)
0.15	4	0.1125
	6	0.1179
0.25	4	0.1250
	6	0.1596
0.50	4	0.3110
	6	0.3222

Tabla 18. Valores de las longitudes de contacto

Vemos que en efecto, y como se esperaba, la longitud de contacto crece según se aumenta la profundidad de corte. También vemos una clara relación con el “shear deletion”: en todos los casos la longitud de contacto es mayor con un “shear deletion” de 6. El paso de un “shear deletion” de 4 a uno de 6 afecta a la longitud de contacto entre un 3.47% y un 21.68% según el caso.

Bajo estos resultados se espera que la temperatura de servicio en la herramienta de corte siga un comportamiento semejante, por lo que gana mayor importancia este estudio para la prevención del desgaste de la herramienta.

4.6 Estudio de la temperatura de servicio de la herramienta de corte

Esta temperatura se mide igualmente en ABAQUS como TEMP solo que en este caso se mide sobre la superficie de desprendimiento de la herramienta. Se ha medido en los nodos pertenecientes a los perfiles antes mencionados. Al igual que con la longitud de contacto entre la herramienta y la viruta, los datos de esta variable se han obtenido en el frame en el que se empieza a separar la viruta. Dado que la herramienta es indeformable, esta temperatura viene únicamente de la fricción con la viruta y por el flujo de calor por conducción desde esta. El interés del estudio de esta variable está en el desgaste que sufre la herramienta debido a las elevadas temperaturas producidas en los procesos de corte.

En un mecanizado a alta velocidad (como es este caso) el mecanismo de desgaste predominante es el desgaste por cráter [29]. Es un desgaste térmicamente activado, es decir, las partículas de la herramienta se difunden en la viruta por la acción de las temperaturas. Así pues, cuanto mayores sean las temperaturas en la herramienta y la zona de contacto con la viruta, mayor será el riesgo de aparición de los cráteres.



Figura 32. Desgaste por cráter [29]

Estudiando las simulaciones se ha comprobado que los valores más altos de temperaturas se localizan en el filo (ver *figura 33*). De esta manera será la zona más expuesta a poder sufrir desgaste por cráter, como sucede en la imagen anterior.

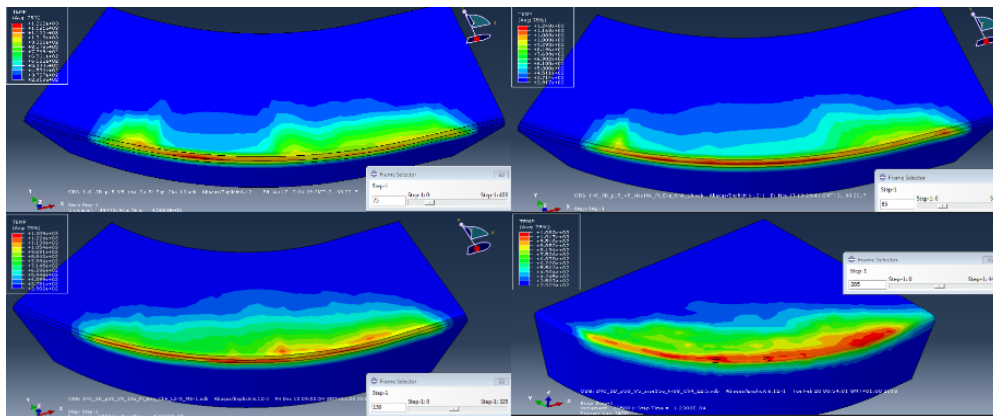


Figura 33. Mapas de temperatura en el filo de la herramienta con distintas profundidades de corte y valores de “shear deletion”

A continuación se muestran los valores obtenidos para la temperatura en la herramienta y se grafican los valores medios y máximos:

Profundidad de corte (mm)	Shear Deletion	Media (K)	Máximo (K)
0.15	4	754.54	1050.73
	6	692.15	1061.11
0.25	4	735.09	1137.21
	6	714.81	1188.41
0.50	4	657.46	1057.03
	6	600.90	1063.98

Tabla 19. Resultados de la temperatura en la herramienta

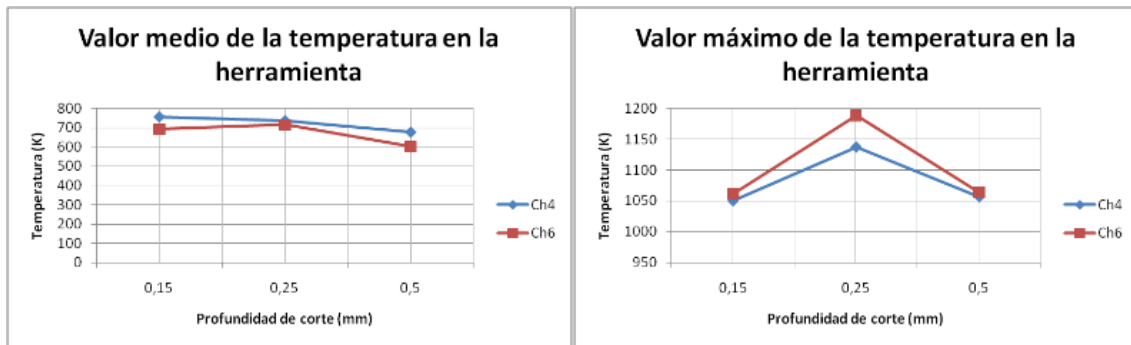


Figura 34. Valores medios y máximos de la temperatura en la herramienta

De los valores medios vemos que no hay diferencia entre los valores de “shear deletion” y hay una pequeñísima tendencia decreciente con la profundidad de corte. Aun así, como con variables anteriores los valores medios no han sido concluyentes y nos hemos fijado en los máximos, se hará lo mismo en este caso. Se aprecia una leve diferencia entre el “shear deletion” de 6 y de 4, alcanzando mayores temperaturas en el primer caso. Por otra parte no se ve relación con el aumento en la profundidad de corte, aunque se alcanzan los valores más altos para 0.25 mm.

CAPÍTULO V

5. Impacto socio-económico y presupuesto

En este capítulo se recoge el impacto socio-económico que tiene este trabajo. También se realiza un breve presupuesto.

5.1 Impacto socio-económico

Como se ha comentado con anterioridad las simulaciones han sido lanzadas por ABAQUS/CAE mediante el MEF. Estos métodos numéricos permiten obtener resultados teóricos ahorrando tiempos, costes y ahorrar el tener que realizar ensayos y obtener datos experimentales.

Todo esto es muy beneficioso para la industria, pues permite mejorar la productividad y la eficiencia. En unas primeras fases de desarrollo es útil para acotar resultados y conseguir una primera aproximación. Es de utilidad para testear diferentes configuraciones y no tener que crear prototipos para cada prueba.

Una dificultad que nos encontramos es la necesidad de personal cualificado que sepa manejar el software y tenga los conocimientos tecnológicos necesarios para realizar las simulaciones. A pesar de esto, los métodos numéricos nos suponen un gran ahorro en el coste de maquinaria, personal en la realización de las pruebas y personal cualificado que analice los resultados. Todo esto no implica que a veces sea necesaria alguna prueba experimental para contrastar resultados.

Aunque la adquisición de una licencia de software de cálculo sea costosa, se puede amortizar para futuros proyectos. Los resultados son aproximados dado que se ha utilizado una ley de comportamiento teórica, aunque son lo suficientemente válidos. No se tienen en cuenta problemas técnicos que suceden en la industria. También se dan por supuestas hipótesis que no se cumplen de manera ideal en la realidad. Otros aspectos que no se incluyen en el modelo son las vibraciones de la maquinaria y la posibilidad de que el filo no esté lo suficientemente afilado.

Un aspecto muy a favor de las simulaciones numéricas es la reducción en el uso de materiales, consumo de energía y contaminación. El no tener que utilizar maquinaria y prototipos hace que los materiales de los que se dispongan puedan ser utilizados para otros fines.

5.2 Presupuesto

Este proyecto se ha realizado en 8 meses. Se ha realizado de una manera aproximada, con unos costes orientativos. Se tiene un coste total de 29210.31 € en el que se incluyen los gastos de personal, equipos (contando amortización) y los costes indirectos estimados en un 15% de los directos.

Se ha contado con un ingeniero junior y un ingeniero senior. Se tiene una proporción de 7 horas de trabajo del ingeniero junior por cada hora de trabajo del ingeniero senior. Se estima un coste de trabajo de 2694.39 € y 4289.54 € respectivamente. De aquí se tiene un coste de personal de 23150.27 €.

Se ha tenido en cuenta el coste de la licencia de ABAQUS, imprescindible para la realización del proyecto. Además se ha contado el coste del ordenador personal y la licencia de Microsoft Office para realizar la memoria. Tienen un coste de 3000 € para la licencia de ABAQUS y 750 € para el ordenador. El periodo de depreciación es de 12 meses para la licencia de ABAQUS y de 24 para el ordenador. Se les asume un uso exclusivo de este proyecto durante los 8 meses de duración del proyecto. En la hoja de presupuesto aparece la fórmula que nos da los costes de amortización de un total de 2250 €.

Se adjunta la hoja de presupuesto a continuación.

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID Escuela Politécnica Superior

PRESUPUESTO DE PROYECTO

1.- Autor: César Rodríguez Abellán

2.- Departamento: Ingeniería Mecánica

3.- Descripción del Proyecto:

- **Título:** Estudio de las Variables Locales en Simulaciones Tridimensionales de Procesos de Corte
- **Duración (meses):** 8
- **Tasa de costes indirectos:** 15%

4.- Presupuesto total del Proyecto (en Euros): 29210.31

5.- Desglose presupuestario (costes directos)**PERSONAL**

Apellidos y nombre	N.I.F. (no rellenar)	Categoría	Dedicación (hombre mes)	Coste hombre mes	Coste (Euros)	Firma de conformidad
Soldani, Xavier		Ingeniero Senior	1	4289.54	4289.54	
Rodríguez Abellán, César		Ingeniero Junior	7	2639.39	18860.73	
Hombres mes			8	Total	23150.27	

EQUIPOS

Descripción	Coste (Euros)	%Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable a)
Ordenador personal	750	100	8	24	250
Licencia de ABAQUS	3000	100	8	12	2000
Licencia de Microsoft Office	0	100	8	12	0
Total					2250

a) $A/B \cdot (C \cdot D)$

A= nº de meses desde la fecha de facturación en el que equipo es utilizado

B= periodo de depreciación (60 meses)

C= coste del equipo (sin IVA)

D= % del uso que se dedica al proyecto

SUNCONTRATACIÓN DE TAREAS

Descripción	Empresa	Costes imputables
	Total	0

OTROS COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO b)

Descripción	Empresa	Costes imputables
	Total	0

- b) Se incluyen todos los gastos no contemplados en los conceptos anteriores, como fungible, viajes, dietas, etc...

6.- Resumen de costes

Presupuesto Costes Totales	Presupuesto Costes totales
Personal	23150.27
Amortización	2250
Subcontratación de tareas	0
Costes de funcionamiento	0
Costes Indirectos	3810.04
Total	29210.31

CAPÍTULO VI

6. Conclusiones y trabajos futuros

Este último capítulo recoge las conclusiones obtenidas del estudio a modo de síntesis. También se plantean una serie de aspectos que sirven como mejoras de este estudio o puntos de partida para posteriores.

6.1. Conclusiones

Antes de empezar el estudio se esperaba un crecimiento de todas las variables en la viruta con la profundidad de corte, junto con una notable diferencia entre los dos valores del “shear deletion”. Respecto a esto se puede decir:

- **PEEQ:** Los valores medios no se han considerado válidos para obtener conclusiones debido a distorsiones en los elementos producidas por el “shear deletion”. Con los valores máximos sí se encuentran diferencias entre los valores de “shear deletion” y se ratifica la relación entre la profundidad de corte y el PEEQ.
- **TEMP:** Igual que en el caso de PEEQ los valores medios presentan una variabilidad tal que no son útiles para el estudio. Solo se encuentra una clara diferencia entre los “shear deletion” en la zona “izquierda”. El único caso en el que se ve una relación con la profundidad de corte es con un “shear deletion” de 6, teniendo diferencias de entre 200 y 500 K.
- **ER:** La variabilidad entre zonas se reduce y en el caso de “izquierda” y “centro” los valores medios crecen con la profundidad de corte independientemente del “shear deletion”. Respecto a los valores máximos no se encuentra impacto en la variación del “shear deletion” en ningún caso, sucediendo lo mismo con la profundidad de corte. Dados los altos valores que se han obtenido de velocidad de deformación podemos decir que la ley de Johnson-Cook no representa adecuadamente el comportamiento del material en estas circunstancias.
- Estudiando estas tres variables vemos que los valores más altos se encuentran la zona principal de cizallado.
- **Longitud de contacto viruta-herramienta:** Tiene una relación directa con la profundidad de corte y que el paso de un “shear deletion” a otro nos produce unas variaciones de entre un 3.47% y un 21.68% según el caso.

- **Temperatura de la herramienta:** Solo vemos impacto, aunque pequeño, en la elección del “shear deletion” para los valores máximos. No se ve relación entre distintas profundidades de corte, aunque se aprecian valores pico en el caso de 0.25 mm independientemente del “shear deletion”.

El que los resultados no hayan cumplido con lo esperado refuerza el interés y la utilidad de este tipo de estudios.

6.2 Trabajos futuros

Basándonos en lo observado a lo largo de todo el estudio se plantean una serie de propuestas que servirían para mejorar el trabajo y como punto de inicio para posibles futuros trabajos:

- Realizar un análisis de sensibilidad de la malla para poder reducir requisitos de computación sin perder información.
- Añadir más valores de profundidad de corte y de “shear deletion” al estudio.
- Añadir al estudio el impacto de otras variables, como por ejemplo la velocidad de corte, el coeficiente de fricción.
- Buscar una ley constitutiva que represente más adecuadamente el comportamiento del material.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Usos del Inconel 718”, *Journalismo.com*, 31-10-2012. [En línea]. Disponible en: <http://www.journalismo.com/pRNvoGQE/>. [Último acceso 23/07/2018]
- [2] D. Romero, “Sube el precio de las barras de inconel”, *Medium*, 4-07-2018. [En línea]. Disponible en: <https://medium.com/@danielrom/sube-el-precio-de-las-barras-de-inconel-d22f889ea3b0>. [Último acceso 34/07/2018].
- [3] “Introducción al método de los elementos finitos: Aplicación a la mecánica de sólidos”. *OCW UC3M*. [En línea]. Disponible en: http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/ingenieria-estructural/material-de-clase-1/apuntes/Capitulo_9.-Introduccion_al_metodo_de_los_elementos_finitos.pdf.
- [4] M. Estrems Amestoy, “2.2 Introducción”, en *Principios de Mecanizado y Planificación de Procesos*. Cartagena, E.T.S. Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Cartagena, 2007, 9-10. [En línea]. Disponible en: http://www.dimf.upct.es/personal/EA_M/Principios%20de%20mecanizado.pdf.
- [5] Material docente de la asignatura “Tecnologías de Fabricación y Tecnología de Máquinas”, 3^{er} curso del Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, 2^o cuatrimestre, UC3M.
- [6] H. Miguélez, J.L. Cantero, J.A. Canteli, J.G. Filippone, *Problemas Resueltos de Tecnologías de Fabricación*. Madrid: Paraninfo, 2005.
- [7] M^a M. Espinosa Escudero, *Introducción a los Procesos de Fabricación*. Madrid: Universidad Nacional de Estudios a Distancia: 2000.
- [8] L.N. López de Lacalle Marcaide, J.A. Sánchez, A. Iamkiz Menchaca, *Mecanizado de alto rendimiento: procesos de arranque*. Bilbao: Ed. Técnicas Izaro, 2004.
- [9] M. Sánchez Carrillero, M. Marcos Bárcena, *Relaciones Paramétricas en el Mecanizado*. Cádiz: Universidad de Cádiz Servicio de Publicaciones, 1994.
- [10] M.P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna, materiales, procesos y sistemas*, 3rd ed. México: Mc-Graw Hill: 1997.
- [11] D. Arrejin, “Metalografía”, *Monografías.com*. [En línea]. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos67/metalografia/metalografia.shtml>. [Último acceso 07/08/2018].
- [12] D. García Balsa, “Simulación del Proceso de Mecanizado por Torno a Alta Velocidad de la Aleación *Inconel 718*”, Trabajo fin de grado, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10762/SIMULACION%20DEL%20PROCESO%20DE%20MECANIZADO%20A%20ALTA%20VELOCIDAD%20DE%20LA%20ALEACION%20INCONEL%20718.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [13] W.H. Cuberly, *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, Desk Edition, Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers. 1949.

- [14] S. Kalpakjian y S.R. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*, 5th ed. México: Pearson Educación, 2008.
- [15] M.M. Moure Cuadrado, “Modelización Numérica de los Fenómenos en Corte Ortogonal del Ti_6Al_4V ”, Proyecto fin de carrera, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10822/MEMORIA%20PROYECTO%20FIN%20DE%20CARRERA%20MARTA%20MARIA%20MOURE%20CUADRADO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [16] “Torno”, *Área Tecnología*. [En línea]. Disponible en: <http://www.areatecnologia.com/herramientas/torno.html>. [Último acceso: 11/08/2018].
- [17] M. McCann et al., “Metalurgia y Metalistería”, en *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo*, 3ª ed. Madrid: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales Subdirección General de Publicaciones, 1998, 82.1-82.65.
- [18] J. Beristain, O. Gonzalo y A. Sandá, “Machinability of Al-SiC metal matrix composites using WC, PCD and MCD inserts”, *Revista de Metalurgia*, Vol. 50, p.e006, mar. 2014.
- [19] J.M. Contreras Andújar, “Estudio de la Influencia de la Morfología y de la Distribución de Tamaños de Partícula en Polvo en la Obtención de Aleaciones Base Cu y Base Ni Mediante la Tecnología MIM”, Tesis doctoral, Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2008. [En línea]. Disponible en: https://bibliotecas.uc3m.es/prim-explore/fulldisplay?docid=TN_cbuc_tes10803/14459&context=PC&vid=34UC3M_VU1&search_scope=TAB1_SCOPE1&tab=tab1&lang=es_ES.
- [20] J.M. Ruiz Prieto, A. Vitores Villena, “Superalaciones”, Metales y Aleaciones no Ferreas, Ed. Gómez-Pardo, pp. 299, 1976.
- [21] “Inconel alloy 718”, *specialmetals.com*. [En línea]. Disponible en: http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/inconel_alloy_718.pdf [Último acceso: 11/08/2018].
- [22] J. Díaz Álvarez, “Análisis Numérico y Experimental del Desgaste de Herramienta e Integridad Superficial en los Procesos de Torneado de Inconel 718”, Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2013. [En línea]. Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/17316/tesis_jose_diaz_alvarez_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [23] W. F. Smith, *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de Materiales*, 3rd ed. McGraw-Hill, 2004.
- [24] M.G. Burke y M.K. Miller, “Precipitation in alloy 718. A combined AEM and APFIM investigation”, en *Superalloys 718, 625 and Various Derivates*. The Minerals, Metals & Materials Society, 1991, 337-350.

- [25] “Specials Metals INCONEL® 718SPF™ Nickel Superalloy, Annealed”, *matweb.com*. [En línea]. Disponible en: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=b95db0912b2a4b8bb0c39b34d3672c73&ckck=1> [Último acceso: 11/08/2018].
- [26] “Inconel® Alloy 718 – Aleación Resistente al Calor (Ni53/Fe19/Cr19/Nb/Mo/Ti)”, *goodfellow.com*. [En línea]. Disponible en: <http://www.goodfellow.com/S/Inconel-alloy-718-Aleacion-Resistente-al-Calor.html>. [Último acceso: 11/08/2018].
- [27] F. Lambert. “Elon Musk’s recent “Ludicrous” announcement hints at more synergy between Tesla and SpaceX”, *electrek.co.*, 22-07-2015. [En línea]. Disponible en: <https://electrek.co/2015/07/22/elon-musks-recent-ludicrous-announcement-hints-at-more-synergy-between-tesla-and-spacex/> [Último acceso: 13/08/2018].
- [28] “Propiedades del Níquel y sus Aleaciones”, *ingemecanica.com*. [En línea]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn109.html> [Último acceso: 11/08/2018].
- [29] X. Soldani, “Modelisation Analytique de l’usinage a grande vitesse et etude de lúsure en cratere – application au tournage”, Tesis doctoral, Université Paul Verlaine – Metz, Metz, Francia, 2008. [En línea]. Disponible en: http://fondation.cetim.fr/pages/projets/THESE-soldani18_02_2009.pdf.
- [30] “Buscador de normas”, *AENOR*. [En línea]. Disponible en: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas> [Último acceso: 15/08/2018].